

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E MATERIAIS PPGE3M

**JOSÉ ROBERTO RONCONI**

**BENEFICIAMENTO DE CARVÃO UTILIZANDO ESPIRAIS: FUNCIONAMENTO,  
LIMITAÇÕES E ASPECTOS AMBIENTAIS**

Dissertação para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre  
2015

**JOSÉ ROBERTO RONCONI**

**BENEFICIAMENTO DE CARVÃO UTILIZANDO ESPIRAIS: FUNCIONAMENTO,  
LIMITAÇÕES E ASPECTOS AMBIENTAIS**

Trabalho realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Ivo André Homrich Schneider

Porto Alegre. RS

2015

**JOSÉ ROBERTO RONCONI**

**BENEFICIAMENTO DE CARVÃO UTILIZANDO ESPIRAIS: FUNCIONAMENTO,  
LIMITAÇÕES E ASPECTOS AMBIENTAIS**

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador, e pela Banca Examinadora do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Orientador: Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider

---

Coordenador: Prof. Carlos Perez Bergmann

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Jean Menezes–UNOESC

---

Dr. Juarez Amaral Filho–LTM – CNPQ

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>.Vlândia Cristina de Souza - UFRGS

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus familiares em especial a minha esposa Viviane Serafim e meu filho Davi Serafim Ronconi pela compreensão à minha ausência em vários momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Como já dizia Anitelli: “Sonho parece verdade quando a gente esquece de acordar”. Hoje, vivo uma realidade que parece um sonho, mas foi preciso muito esforço, determinação, paciência, perseverança, ousadia e maleabilidade para chegar até aqui, e nada disso eu conseguiria sozinho.

Minha eterna gratidão a todos aqueles que colaboraram para que este sonho pudesse ser concretizado.

Agradecer a Carbonífera Criciúma SA, pelas informações e amostras cedidas para a realização deste trabalho.

A SATC, por possibilitar as análises dentro dos seus laboratórios.

Agradeço também a Juarez Ramos do Amaral Filho, Jean Silveira, Jéssica Weilere Beatriz Firpo pela ajuda na parte experimental.

Grato a Deus pelo dom da vida, pelo seu amor infinito, sem Ele nada sou. Agradeço aos meus pais, Domingos e Lenoir, meus maiores exemplos. Obrigada por cada incentivo e orientação, pelas orações em meu favor, pela preocupação para que estivesse sempre andando pelo caminho correto.

Em especial a minha esposa Viviane, sem a qual, me dando força e incentivo não estaria hoje concluindo este trabalho, meu muito obrigado, e a meu filho Davi, minha razão de viver.

A meu irmão, Adão Paulo, por todo amor e carinho.

Ao professor Dr. Ivo André Homrich Schneider que, com muita paciência e atenção, dedicou do seu valioso tempo para me orientar em cada passo deste trabalho.

Obrigada a todos que, mesmo não estando citados aqui, tanto contribuíram para a conclusão desta etapa e para quem sou hoje.

## RESUMO

Espirais concentradoras têm sido largamente empregadas no beneficiamento de finos de carvão no Brasil. O objetivo geral deste trabalho foi estudar do beneficiamento de carvão em uma espiral, avaliando a eficiência do beneficiamento do carvão da Camada Barro Branco e caracterizando seus produtos. Ênfase foi dada ao rejeito, avaliando as possibilidades de aproveitamento do material e o seu potencial de geração de acidez. A metodologia do trabalho incluiu a caracterização da alimentação e dos produtos de uma espiral em termos de análise imediata e enxofre; estudo da lavabilidade do carvão de alimentação; avaliação da eficiência do beneficiamento e a caracterização do rejeito em termos ambientais. Em valores médios, a alimentação das espirais apresenta um teor de cinzas de 67,5%, um teor de enxofre de 5,2% e um poder calorífico superior de 2377 cal/g. O concentrado apresentou um teor de cinzas de 50,5%, um teor de enxofre de 1,7% e um poder calorífico superior de 3978 cal/g; enquanto que o rejeito um teor de cinzas 78,2%, um teor de enxofre de 7,5% e um poder calorífico superior de 1364 cal/g. A recuperação mássica de concentrado é de aproximadamente 40%. O concentrado atende as especificações da termoelétrica em relação ao teor de enxofre e matéria volátil, mas não atende as especificações de cinzas e poder calorífico. O concentrado das espirais consegue destinação uma vez que é misturado a carvões de melhor qualidade produzidos pela mesma ou outras mineradoras. Quanto a lavabilidade, na densidade de corte de 2,0, o valor do NGM foi de 15%, caracterizando o material como moderadamente difícil ou de difícil separação. A eficiência do beneficiamento na espiral é baixa. O valor do Desvio Provável Médio (EPM), Imperfeição (I) e a Área de Erro foram, respectivamente, de 0,30, 0,30 e 178,13 cm<sup>2</sup>. Esses parâmetros apontam que o equipamento não apresenta uma boa precisão de separação. O rejeito de carvão descartado da espiral apresenta um NNP de - 209 kg CaCO<sub>3</sub>/t, indicando um alto potencial de geração de drenagem ácida. Deve-se somar a isso a baixa granulometria (entre 0,1 e 2,0 mm) e a alta área superficial (41 m<sup>2</sup>/g) do material, que propiciará taxas mais altas de geração de acidez que o rejeito grosso. Analisando os dados, as espirais, mesmo com a baixa precisão, estão exercendo sua função de forma satisfatória para a empresa no sentido de produção de um carvão energético com teor de S aceitável.

**Palavras-chave:** carvão mineral, beneficiamento, espiral, pirita, meio ambiente

## ABSTRACT

Spiral concentrators have been widely used to process coal fines in Brazil. The aim of this work was to study coal beneficiation in a spiral, evaluating its performance for the “Barro Branco” seam. Emphasis was given to the waste material, evaluating a potential use and the acid generation. The methodology of this project included the characterization of the feed and the products of the spiral in terms of immediate analysis, washability curve of coal, and the equipment efficiency in terms of Tromp Curve. The feed material has an ash content of 67.5%, a sulfur content of 5.2%, and a gross calorific value of 2377 cal/g. The concentrate showed an ash content of 50.5%, a sulfur content of 1.7% and gross calorific value of 3978 cal/g; while the reject one had an ash content of 78.2%, a sulfur content of 7.5%, and a gross calorific value of 1364 cal/g. The recovery of the concentrated weight is approximately 40%. The concentrated meets the thermal specifications related to sulfur content and volatile matter, but it does not meet the specifications of ashes and calorific values. So, it is mixed with coals of better quality to attend the thermoelectric standards. Concerning the wash ability, in the cut density of 2.0, the NGM was 15%, characterizing the material as moderately difficult or difficult to separate. Analyzing the Tromp Curve, the value of the deviation probable medium (EPM), Imperfection (I) and the Error Area were, respectively, 0.30, 0.30 and 178.13 cm<sup>2</sup>. These parameters indicate that the equipment does not show a good precision of separation. The rejected material on the spiral showed a NNP of - 209 kg CaCO<sub>3</sub>/t, indicating a high potential for acid drainage generation. It should be considered that the material presented a fine particle size (0.1 to 2.0 mm) and a high surface area (41 m<sup>2</sup>/g), which certainly will provide high pyrite oxidations rates. Analyzing the data as a whole, spirals, even with the low precision, is exercising their function to provide an energetic coal with an acceptable sulphur content, leaving no doubt about its applicability.

**Keywords:** coal, beneficiation, spiral, pyrite, environment

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Minerador Contínuo.....	18
Figura 2 - Correia transportada .....	18
Figura 3 - Circuito de britagem da UMII-Verdinho .....	19
Figura 4 - Parâmetros geométricos de uma espiral concentradora.....	22
Figura 5 - Principais zonas na calha da espiral .....	22
Figura 6 - Espiral convencional empregada na usina de beneficiamento de carvão da Carbonífera Criciúma S.A. (a) e detalhe da placa divisória da espiral (b). .....	24
Figura 7 - Exemplo de uma curva de separabilidade - carvão .....	25
Figura 8 - Curva de partição de um equipamento de beneficiamento gravimétrico de carvões.....	27
Figura 9 - Reações do processo da produção de acidez proveniente da Drenagem Ácida .....	31
Figura 10 - Fluxograma de britagem do ROM .....	35
Figura 11 - Fluxograma do circuito de grossos .....	36
Figura 12 – Fluxograma do circuito de finos de carvão da UM II. Espiral em destaque foi a espiral estudada .....	37
Figura 13 - Desenho esquemático mostrando a operação normal.....	39
Figura 14 - Peneirador utilizado na análise granulométrica das amostras .....	42
Figura 15 - Distribuição granulométrica da alimentação, concentrado e rejeito de uma amostra de carvão beneficiada em uma espiral coletada em 01/04/2015.....	47
Figura 16 – Curvas de separabilidade densimétrica da alimentação da espiral beneficiando o carvão da camada Barro Branco de Santa Catarina.....	50
Figura 17 - Curva de Tromp de uma espiral do beneficiamento do carvão da camada Barro Branco em Santa Catarina .....	51
Figura 18 - Área de erro da espiral estudada.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais equipamentos empregados na concentração do carvão mineral .....	20
Tabela 2 - Aplicabilidade de processos de separação densimétrica .....	26
Tabela 3 - Volume e normalidade de ácido hidrocloreídrico usado por cada intensidade do teste “fizz” .....	32
Tabela 4 - Dados técnicos das espirais empregadas na Mina do Verdinho da Carbonífera Criciúma S.A.....	38
Tabela 5 – Parâmetros de exigência da usina de geração de energia Jorge Lacerda .....	44
Tabela 6 - Resultados da análise imediata da alimentação e produtos de uma espiral no beneficiamento de finos de carvão da Camada Barro Branco em 4 amostras.....	45
Tabela 7 - Análise granulométrica da alimentação e dos produtos .....	47
Tabela 8 - Análise granuloquímica da alimentação das espirais.....	47
Tabela 9 - Análise densimétrica da alimentação das espirais .....	48
Tabela 10 - Parâmetros derivados da curva de partição .....	51
Tabela 11 - Balanço de massa e análises imediata do material de alimentação e saídas na operação da espiral (concentrado e rejeito).....	53
Tabela 12 – Comparativo entre a geração de rejeitos finos do circuito de espirais e os rejeitos grossos gerados na operação de jigagem.....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS

Kg	Quilograma
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
DAM	Drenagem Ácida de Mina
Fe <sup>3+</sup>	Ferro
S.A.	Sociedade Anônima
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
ROM	Run-Of-Mine
UM II	Unidade Mineira II
NGM	NearGravity Material
AE	Área de Erro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
D50	Densidade de Corte
EPM	Desvio Provável
I	Imperfeição
Há	Hectares
LAEC	Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
SATC	Sociedade de Assistência aos Trabalhadores do Carvão
CCSA	Carbonífera Criciúma S.A
t/h	tonelada por hora
mm	milímetros
WOC	water only cyclone
CHBr <sub>3</sub>	Bromofórmio
C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	Percloroetileno
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	Xileno
CNH	Carbono, Nitrogênio e Hidrogênio
ASTM	American Society for Testing and Materials
ABA	Ácido/Base
NP	Potencial de Neutralização
AP	Potencial de Geração de Acidez

NNP	Potencial de Neutralização Líquido
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
NaOH	Hidróxido de Sódio
HCl	Ácido Clorídrico
Eq	Equivalente
N	Normalidade

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. OBJETIVOS .....	15
3. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	16
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
4.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE LAVRA E BENEFICIAMENTO DE CARVÃO EM SANTA CATARINA .....	17
4.2. ESPIRAIS CONCENTRADORAS .....	21
4.3. FUNDAMENTOS DO BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO .....	24
4.4. RESÍDUOS MINERAÇÃO DE CARVÃO .....	28
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	34
5.1 FLUXOGRAMA DA USINA .....	34
5.1.1 Classificação e Britagem .....	34
5.1.2 Concentração Mineral .....	35
5.1.3 Fluxograma Circuito de Grossos .....	36
5.1.4 Fluxograma Circuito de Finos.....	37
5.2. ESPIRAIS.....	38
5.3 AMOSTRAGEM .....	38
5.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	39
5.5 ANÁLISES DENSIMÉTRICAS .....	39
5.6 ELABORAÇÃO DAS CURVAS DE LAVABILIDADE .....	40
5.7 ELABORAÇÃO DA CURVA DE PARTIÇÃO .....	41
5.8 CARACTERIZAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO, CONCENTRADO E PRODUTOS ...	41
5.8.1 Análise Imediata.....	41
5.8.2 Enxofre Total .....	42
5.8.3 Poder Calorífico Superior .....	42
5.8.4 Predição da geração de acidez pela contabilização de ácidos e bases .....	43
5.8.5 Medição da Área Superficial.....	44
5.9 PARAMETROS DE EXIGENCIA DA USINA JORGE LACERDA.....	44
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
6.1 DADOS GERAIS DE PROCESSO.....	45
6.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE ALIMENTAÇÃO.....	47

6.3 EFICIÊNCIA DO PROCESSO.....	51
6.4 AVALIAÇÃO AMBIENTAL.....	52
7. CONCLUSÕES.....	55
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	57
REFERÊNCIAS.....	58
ANEXO.....	61

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a indústria carbonífera tem se aprimorado, devido a implantação de novas tecnologias para os processos de extração e beneficiamento do minério, bem como a utilização dos subprodutos agregando valor a estes. Estudos têm sido desenvolvidos por empresas mineradoras da região que, nos últimos anos, priorizaram políticas de recuperação e proteção ambiental, de segurança e saúde do trabalhador e investimentos na qualificação tecnológica das minas.

Os problemas gerados a partir da mineração do carvão na região carbonífera de Santa Catarina são inúmeros, e vão desde a abertura dos empreendimentos até os passivos deixados no passado, incluindo depósitos de rejeito a céu aberto, geração de drenagem ácida e rios degradados.

Independente da forma de extração, a mineração de carvão gera uma quantidade considerável de rejeitos, que são depositados em pilhas ou barragens próximas às áreas mineradas. De cada 1000 kg de material minerado, aproximadamente 600 kg é composto por “rejeitos e estéreis” que são depositados no entorno da área minerada. Os depósitos de rejeitos são grandes geradores de DAM, principalmente os mais antigos, que não levavam em conta aspectos construtivos para minimizar o processo de oxidação da pirita.

Um dos principais problemas relacionados é decorrente do fato de que associado ao carvão mineral ocorre a mineralização de pirita. Esse mineral, quando exposto ao oxigênio e umidade, oxida-se, gerando, entre outros produtos, ácido sulfúrico, sendo este responsável pela chamada Drenagem Ácida de Mina (DAM).

A DAM é uma água contaminada caracterizada por altos teores de ferro, alumínio e ácido sulfúrico, razão pela qual pode apresentar coloração esverdeada ou laranja-amarelado, dependendo do estado predominante do ferro ( $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$ ). Quando este líquido chega aos rios, córregos e lagoas; altera as condições do ambiente, propiciando condições impróprias para vida aquática e consumo humano (Skousen, 1998; Kontopoulos, 1998).

Contudo, o rejeito de carvão contendo pirita apresenta a possibilidade de aproveitamento. A pirita pode ser concentrada e transformada em produtos de valor agregado como, por exemplo, ácido sulfúrico, abrasivos, pigmentos, entre outros.

O beneficiamento de carvões no Brasil é feito em jigues e ciclones de meio denso para o processamento de carvões na fração entre 50 a 2 mm, espirais nas frações

entre 2,0 e 0,5 mm e flotação na fração inferior a 0,5 mm. Estudos de processamento de rejeitos de carvão nas frações grossas foram conduzidos por Amaral Filho (2014); porém poucos estudos focaram nas frações finas.

No caso das espirais, o produto é um carvão de uso energético. Como o material é bastante fino, é misturado ao carvão com granulometria maior e encaminhado para queima para a usina termo elétrica. O rejeito, com alto teor de pirita e alta área superficial, devido a sua granulometria, é encaminhado para módulos de rejeitos. Quanto ao uso das espirais, vale descrever o seguinte parâmetro:

As espirais concentradoras têm sido alvo de constante desenvolvimento, visando o processamento de minerais na faixa -3,00 +10 mm. As espirais são consideradas excelente alternativa de aplicação frente as mesas concentradoras, ao jigge de finos, ao ciclone autógeno e em alguns casos, a flotação. Particularmente, para o caso do carvão, as espirais mais utilizadas são as da linha Reichert, as quais apresentam quatro modelos: LD 2, LD 4, LD 9 (altos teores de cinzas e pirita) e LD 10 (baixos teores de cinzas e pirita). Fundamentalmente, os parâmetros mais influentes na performance da espiral estão divididos em: parâmetros de projeto (raio e passo do helicóide, perfil da calha, ângulos, etc.), e parâmetros de operação (taxa de alimentação, concentração de sólidos, faixa granulométrica, etc). (Cavalcante e Sampaio, 1992)

Contudo, pouco se sabe sobre as características do rejeito descartado pelas espirais, tanto em termos de seu potencial de aproveitamento como os danos ambientais decorrente do seu descarte, sendo este o foco do presente trabalho.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi o estudo do beneficiamento de carvão em uma espiral, avaliando a eficiência do beneficiamento e caracterizando seus produtos. Ênfase foi dada ao rejeito, avaliando as possibilidades de aproveitamento do material e o seu potencial de geração de acidez.

Os objetivos específicos foram:

- (a) caracterização da alimentação e dos produtos de uma espiral em termos de análise imediata;
- (b) caracterizar a lavabilidade do carvão de alimentação;
- (c) avaliar a eficiência do beneficiamento em espirais;
- (d) caracterizar o rejeito em termos ambientais;
- (e) verificar possíveis utilidades do rejeito, agregando valor.

### **3. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA**

A pesquisa delimita-se para o carvão da Camada Barro Branco da região carbonífera de Santa Catarina – Brasil - explorado na Mina do Verdinho pela Carbonífera Criciúma S.A no período de 2013-2014.

#### 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item será abordado de forma geral como acontece o processo de extração e beneficiamento do carvão mineral em Santa Catarina. Ênfase será dada ao processo de concentração da pirita em espirais.

##### 4.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE LAVRA E BENEFICIAMENTO DE CARVÃO EM SANTA CATARINA

O carvão mineral é um combustível fóssil natural, formado pela decomposição da matéria orgânica (como restos de árvores e plantas) durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. É composto por átomos de carbono, oxigênio, nitrogênio, enxofre, associados a outros elementos rochosos (como arenito, siltito, folhelhos e diamictitos) e minerais, como a pirita (Monteiro, 2004).

O carvão mineral é uma das maiores fontes de energia do país. As maiores reservas de carvão estão localizadas no Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná com 28,8 bilhões, 3,4 bilhões e 100 milhões de toneladas respectivamente. (NASCIMENTO, 2002).

Conforme Borba (DNPM, 2001), “em Santa Catarina, o carvão ocorre na bacia Sul-Catarinense, indo de sul para norte do município de Araranguá ao de Lauro Müller, com cerca de 21% das reservas medidas oficiais brasileiras (1.525.021.083 t) e 22% das provadas e prováveis (201.921.000 t). Trata-se de um carvão coqueificável pobre e energético pobre a médio, admitindo algum beneficiamento e transporte a curta distância. As partes a céu aberto e de subsolo rasas já foram quase todas mineradas, de modo que há uma crescente dificuldade dessa jazida em manter um ritmo intenso de lavra, com minas profundas e estruturalmente difíceis”. O carvão produzido é dividido em dois tipos: energético e metalúrgico. O carvão energético é destinado às termelétricas e o metalúrgico principalmente para a fabricação de agregados siderúrgicos e produtos carboquímicos”.

As camadas lavradas na região carbonífera de Santa Catarina são a camada Barro Branco, camada Bonito e a camada Irapuá (Brasil, 1972).

A lavra do minério dá-se pelo método de câmaras e pilares, o qual consiste na escavação de galerias dimensionadas para deixar pilares constituídos pela própria camada de carvão, desenvolvidos de tal forma que permitam a manutenção dos

sistemas de transporte, drenagem e ventilação, sem risco de subsidências ou desmoronamentos. Para o bom desenvolvimento deste processo, são empregados equipamentos especialmente dimensionados para as características da jazida, como mineradores contínuos (Figura 1) ou a tradicional sequência de furação, desmonte por explosivos, recolhimento por mini pá-carregadeira. O transporte até a superfície dá-se por correias transportadoras. A perfuratriz de teto fecha o ciclo com a fixação de parafusos destinados a estabilizar o teto exposto pelo desmonte (Schneider, 2013). As Figuras 1 e 2 mostram um minerador contínuo e o sistema de transporte por correias para a superfície.



Figura 1. Minerador contínuo. Fonte: autor



Figura 2: Correia transportada. Fonte: autor

O carvão bruto, obtido diretamente da mina e transportado até a superfície, é denominado de minério “run-of-mine” (ROM). Esse minério é caracterizado por uma diversidade de constituintes de origem mineral, basicamente rochas sedimentares

intercaladas com camadas de carvão, exigindo operações de adequação granulométrica e concentração para o seu uso (“beneficiamento”).

A primeira etapa do beneficiamento é a britagem e a classificação granulométrica. O minério bruto (ROM) é descarregado sobre conjunto de peneiras classificadoras, que fazem a separação do material, separando os fragmentos que já se encontram abaixo de 50 mm. O material de tamanho maior é encaminhado para os britadores que são responsáveis pela redução do tamanho deste material, condição necessária para liberação do carvão dos outros constituintes, tais como a pirita e materiais rochosos. A Figura 3 apresenta uma imagem de uma unidade de britagem.

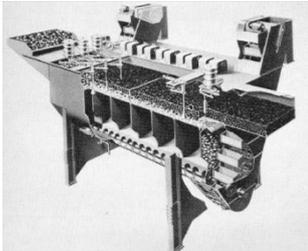
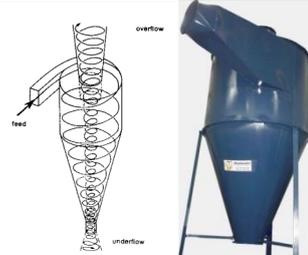
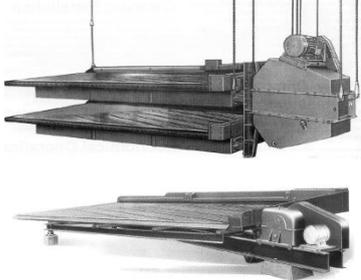


Figura 3: Circuito de britagem da UMII-Verdinho.  
Fonte: Schneider, 2013.

A concentração envolve a separação do carvão de materiais inertes ou indesejáveis. No beneficiamento gravimétrico, o carvão é separado em virtude das diferenças de densidade entre os constituintes minerais. Na flotação, a separação ocorre pela diferenciação entre propriedades superficiais dos minerais, no caso a hidrofobicidade.

Geralmente, as plantas de beneficiamento contam com circuitos de grossos e de finos. A Tabela 1 apresenta um apanhado de equipamentos empregados no beneficiamento de carvões (Weiler, 2014), incluindo jigues e meios densos para o beneficiamento gravimétrico de grossos; espirais, mesas, ciclones para o beneficiamento gravimétrico de finos; e a flotação para o beneficiamento físico-químico de ultra-finos.

Tabela 1. Principais equipamentos empregados na concentração do carvão mineral (Weiler, 2014).

Processamento mineral			
Processo	Tipo de partículas	Princípio de separação	Ilustração
Jigue	Grossos	Partículas de diferentes densidades se separam em corrente pulsante de água	
Meio Denso	Grossos	Partículas de diferentes densidade se separam em um meio com densidade intermediária (polpa de água com magnetita ou água com ferrosilício)	
Espirais	Finos	Força centrífuga separa partículas mais pesadas das leves na superfície do canal da espiral	
Ciclone	Finos	As partículas estratificam-se de acordo com as diferenças de densidades e após, entram em fluxo ascendente durante a fase inicial de sua aceleração, na direção radial do ciclone	
Mesas concentradoras	Finos	Concentração de partículas em película de água, na direção da largura da mesa e estratificação das partículas de acordo com as diferenças em densidade, tamanho e forma na direção longitudinal da mesa.	
Flotação	Ultrafinos	Fenômenos físico-químicos superficiais, onde bolhas de ar aderem-se às partículas hidrofóbicas (carvão) levando-as à superfície	

O circuito de grossos (50 mm a 2,0 mm) é representado pelas partículas passíveis de concentração por ciclones de meio denso ou jigagem. No processo de jigagem, o minério é imerso na água, sobre uma grelha que permite a passagem de fluxos de água, promovendo variações de fluxo (ascendente/descendente) através da camada de minério, artifício pelo qual a densidade do meio leva as partículas de carvão (mais leves) para o topo, enquanto as partículas mais pesadas (rejeitos) acabam concentrando no fundo (Rubio, 1988; Sampaio e Tavares, 2005).

Já no circuito de finos, há inicialmente uma separação granulométrica em hidrociclones, de forma a direcionar a fração superior ( $\varnothing$  1,0 mm a  $> 0,074$  mm) para o processamento em equipamentos gravimétricos e da fração ultra-fina ( $\varnothing < 0,074$  mm) para processos físico-químicos. Para a concentração dos finos de carvão, o número de opções aumenta bastante. Processos gravimétricos incluem ciclones e cilindros a meio-denso, mesas concentradoras, espirais e calhas; processos físico-químicos contemplam flotação e aglomeração oleosa (Leonard et al., 1979; Rubio, 1988; Sampaio e Tavares, 2005).

Devido a ênfase do presente trabalho, segue um detalhamento sobre o beneficiamento em espirais.

#### 4.2. ESPIRAIS CONCENTRADORAS

A espiral concentradora foi desenvolvida pelo engenheiro I. B. Humphreys no início da década de 1940, com o objetivo de recuperar ouro associado à pirita. A primeira aplicação industrial foi na concentração de cromita, no estado norte-americano do Oregon, em 1943. Em 1960, pela primeira vez foi empregada na concentração de hematita especular em Quebec, no Canadá, sendo o número de espirais próximo a 2.000 unidades. Somente após a queda da patente, a espiral ganhou maior espaço. Mudanças de vários aspectos foram acrescentadas ao projeto original, aumentando a eficiência e a aplicabilidade do equipamento (ARENARE, 2008).

Conforme Arenare (2008), “a espiral concentradora consiste de uma disposição helicoidal de calhas ao redor de uma coluna central”, como mostra a Figura 4. As principais variáveis geométricas são: o passo, a altura, a inclinação e a inclinação radial da calha.

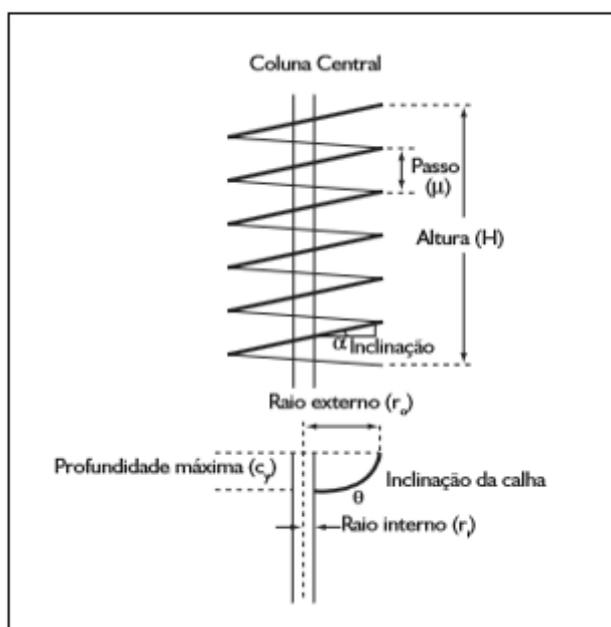


Figura4: Parâmetros geométricos de uma espiral concentradora.  
Fonte: Arenare, 2008.

Segundo Holland-Batt (1995), “na calha de uma espiral existem basicamente dois fluxos: um fluxo primário, no sentido descendente devido à ação da força gravitacional, e um fluxo secundário, no sentido transversal à calha e devido à ação da força centrífuga”. Estes dois fluxos produzem uma distribuição das partículas como apresentado na Figura 5. Podem ser observadas duas zonas principais, separadas por uma zona intermediária”.

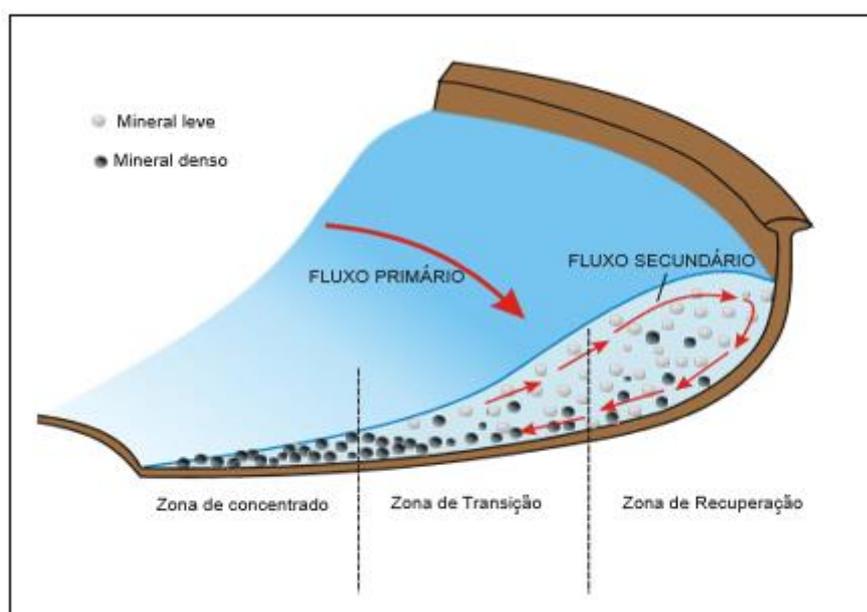


Figura 5: Principais zonas na calha da espiral.  
Fonte: Holland-Batt, 1995.

Conforme Sampaio e Tavares (2005), as espirais são equipamentos principalmente usados para a concentração de materiais finos em película de água. A espiral basicamente consiste de uma calha em forma de helicóide, de seção semicircular e suportada por uma coluna central, na qual uma polpa de alimentação é introduzida por meio de uma caixa de alimentação, posicionada acima do equipamento. A separação das partículas se dá pela ação combinada das forças gravitacional, centrífuga, de arraste, dispersivas e de atrito, à medida que a polpa desce em movimento espiral. Uma vez depositadas na superfície da calha, as partículas formam um leito, o qual estratifica as partículas. As partículas mais finas e densas movem-se até a base do leito, enquanto as mais leves e grossas movem-se para cima, como resultado da ação dos mecanismos da sedimentação retardada, da consolidação intersticial e das forças de cisalhamento. As partículas posicionadas mais próximo da base do leito se deslocarão juntamente ao fluido naquela região, na direção da coluna central, enquanto aquelas localizadas próximo ao topo, tipicamente as grossas e leves, serão arrastadas na direção da borda externa da calha. O resultado é a segregação das partículas de diferentes tamanhos e densidades radialmente na calha. A separação dos produtos contidos nos diferentes fluxos da espiral é realizada de diferentes maneiras, podendo ser realizada ao longo ou no final da calha com a utilização de desviadores de fluxo ou simples orifícios. Esses equipamentos são caracterizados por apresentarem baixos custos de operação e investimento, alta capacidade de recuperação e facilidade de operação e instalação.

No beneficiamento de carvões, as espirais têm a função de separar o material carbonoso dos materiais silicatados e da pirita, por meio das diferentes densidades dos materiais. O material “bruto” entra na espiral na extremidade superior da mesma, e ao longo da espiral os materiais são separados. Teoricamente, a pirita ( $d$  entre 4,95 – 5,1) ficaria na parte interna da espiral, silicatos ( $d$  entre 2,6 e 2,8) na parte intermediária enquanto que o carvão ( $d$  entre 1,4 e 1,6) na parte externa da mesma. Na sequência é apresentada em detalhe uma imagem da parte inferior da espiral, onde acontece definitivamente a separação dos minerais do carvão por uma “palheta” divisora.

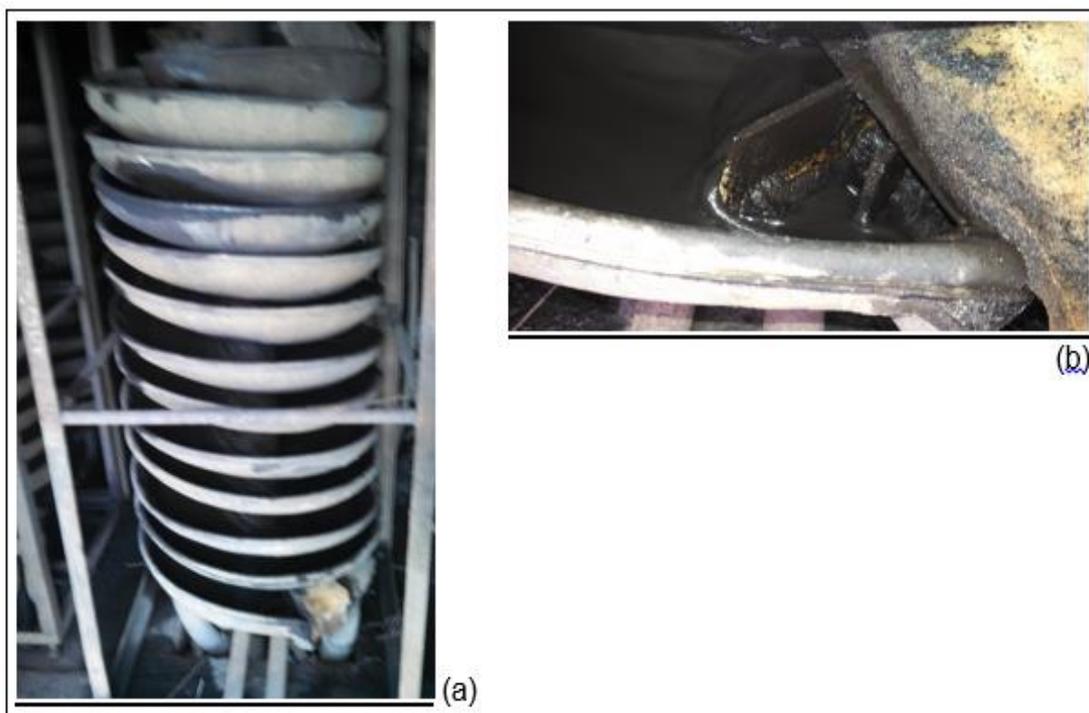


Figura 6. Espiral convencional empregada na usina de beneficiamento de carvão da Carbonífera Criciúma S.A (a) e detalhe da placa divisória da espiral (b).  
Fonte: autor, 2014.

#### 4.3. FUNDAMENTOS DO BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO

A separação da faixa aproveitável do minério ou rejeito pode ser inferida através das curvas de separabilidade densimétrica (Figura 7), também conhecidas como curvas de Henry-Reinhardt ou curvas de lavabilidade. Estas curvas são construídas para uma determinada faixa granulométrica; obtendo-se, assim, a recuperação mássica e os teores dos produtos em qualquer densidade particular (Sampaio e Tavares, 2005). As curvas mais frequentemente utilizadas são: a curva densimétrica, a curva dos flutuados e afundados e a curva de tolerância (*Near Gravity Material* ou simplesmente NGM). Tais curvas proporcionam dados qualitativos ou quantitativos dos produtos da separação na densidade relativa selecionada. Também fornecem dados sobre a dificuldade da separação gravimétrica dos materiais. Geralmente, os dados são provenientes de ensaios de afunda-flutua também conhecidos como ensaios densimétricos descritos na NBR 8738 (ABNT, 1985).

Assim, as curvas de separabilidade permitem extrair informações gráficas que podem ser utilizadas na avaliação das características de lavabilidade de um minério.

A curva densimétrica representa a proporção acumulada de partículas

afundadas ou flutuadas esperada em cada densidade do líquido. Para a elaboração do gráfico, a proporção acumulada flutuada é plotada no eixo da ordenada e a densidade de separação, no eixo da abscissa. O formato desta curva oferece uma indicação de dificuldade a ser encontrada na separação. Portanto, através dessa curva, pode-se observar em qual intervalo densimétrico se encontra a maior liberação do material orgânico em relação ao material inorgânico, além da maior quantidade de massa acumulada de tais materiais (Tavares e Sampaio, 2005).

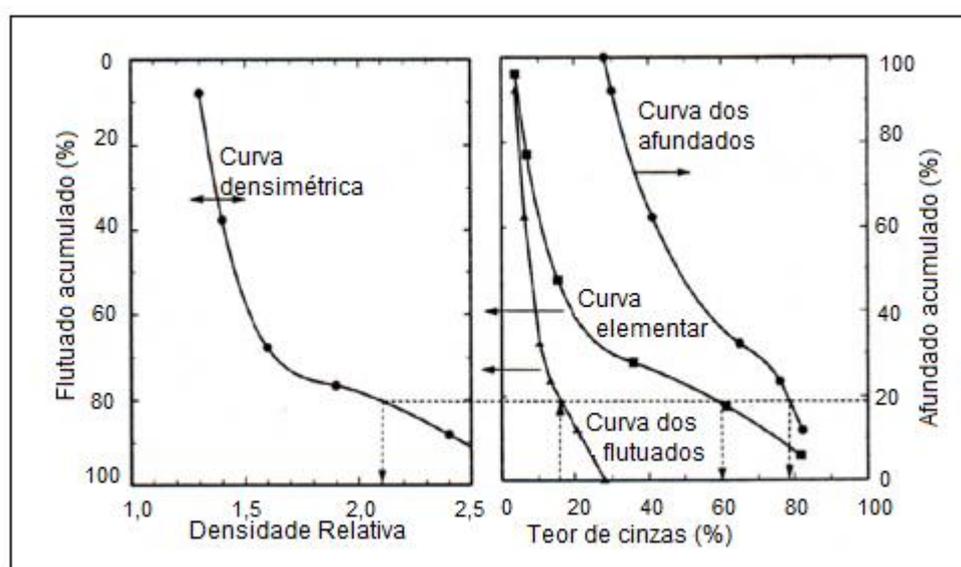


Figura 7. Exemplo de uma curva de separabilidade – carvão.  
Fonte: Tavares e Sampaio (2005).

No gráfico dos flutuados e afundados, os teores são lançados em função da massa acumulada flutuada e afundada, respectivamente, para cada intervalo de densidade. Essas curvas são usadas, juntamente com a curva densimétrica, na previsão de percentagem de massa e teores dos produtos da separação a qualquer densidade em particular. Alternativamente, o procedimento inverso pode ser usado para determinar a densidade de separação necessária para atingir um teor desejado no produto afundado ou flutuado. Nessas curvas, o valor a qualquer densidade representa o teor médio das partículas flutuadas ou afundadas naquela densidade (Sampaio e Tavares 2005).

Com relação à curva que representa o NGM, essa é muito importante porque determina a quantidade de partículas que tem densidades próximas à densidade de corte estipulada no equipamento de beneficiamento gravimétrico. Partículas com densidades muito próximas à densidade de separação apresentam maior probabilidade de se reportar ao produto impróprio, causando contaminação do produto

flutuado por partículas densas e vice-versa. A curva NGM é preparada a partir da proporção de partículas com densidade dentro de um intervalo estabelecido, em função da densidade de separação. A proporção de material com densidade próxima à de separação é, normalmente, considerada como aquela correspondente ao intervalo de  $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  em relação à densidade de corte. Assim, a separação em uma densidade em que os valores de NGM são baixos produz bons resultados mesmo em aparelhos com baixa precisão. Por outro lado, quando os valores de NGM são altos, é necessário empregar equipamentos com alta precisão (Tavares e Sampaio, 2005).

Majumber e Barnwal (2004) confirmam a importância da curva NGM e afirmam que é o melhor parâmetro para avaliar o grau de dificuldade do beneficiamento. A Tabela 2 indica o tipo de equipamento gravimétrico que pode ser usado no beneficiamento de carvão de acordo com a escala de valores de NGM.

Tabela 2. Aplicabilidade de processos de separação densimétrica em função do NGM.

NGM (%) (Distribuição com escala de $0,1 \text{ g/cm}^3$ )	Grau de dificuldade esperado	Processo gravimétrico recomendado	Tipo
0-7	Simple	Quase qualquer processo a altas taxas de alimentação	Separação em meio denso, jiges, calhas, cones, mesas, espirais
7-10	Relativamente simples	Processo eficiente a altas taxas de alimentação	
10-15	Moderadamente difícil	Processo eficiente	
15-25	Difícil	Processos de meio denso	Separação em meio denso
> 25	Extremamente difícil	Processos de meio denso com estrito controle da densidade do meio	Separação em meio denso com controle estrito da densidade do meio

Fonte: Bird, *apud* Tavares e Sampaio (2005), modificado

Deve-se ressaltar, todavia, que os dados de recuperação obtidos a partir das curvas densimétricas e das curvas dos afundados e flutuados são para uma perfeita separação. Por essa razão, esses dados são trabalhados como valores teóricos. Dependendo da eficiência do equipamento empregado, os valores práticos podem ser próximos ou diferentes dos valores teóricos. Assim, quanto maior for a eficiência na separação, mais próximos os valores práticos serão dos valores teóricos obtidos através das curvas de separabilidade (Horsfall, 1980). A eficiência de um equipamento na separação em uma determinada densidade de corte pode ser analisada pela curva

de partição, também conhecida como curva de Tromp (Figura 8) (Rubio, 1988; Tavares e Sampaio, 2005).

A curva de partição define quantitativamente a proporção de massas por faixa densimétrica que o equipamento distribui para os produtos. Para determinar-se a curva de partição de um determinado aparelho, são necessárias as recuperações e as análises densimétricas dos produtos considerados. O procedimento geral consiste em processar os dados de forma ponderada para o cálculo dos coeficientes de partição ou distribuição de massas. Os coeficientes assim calculados são lançados nas ordenadas enquanto nas abcissas são lançados os valores de densidades médias de cada fração (Rubio, 1988).

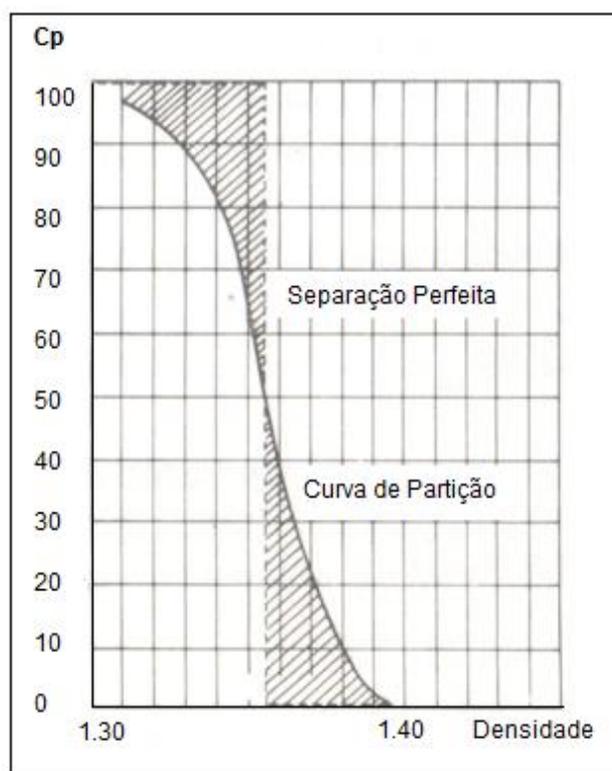


Figura 8. Curva de partição de um equipamento de beneficiamento gravimétrico de carvões. Fonte: Rubio, 1988.

Os principais parâmetros derivados da curva de partição são (Rubio, 1988):

- (a) Densidade de separação ou de corte ( $D_{50}$ ): densidade coincidente com um coeficiente de partição igual a 50%. Representa, portanto, a densidade na qual uma partícula teria igual probabilidade de se reportar ao produto ou rejeito.
- (b) Desvio provável médio (EPM): critério que representa a precisão de separação. É uma medida do desvio da curva de partição em relação a

curva de separação perfeita. Numericamente, pode ser calculado pelas equações (01) e (02):

$$EPM = D50 - D75 \quad (01)$$

ou

$$EPM = \frac{D25-D75}{2} \quad (02)$$

(c) Imperfeição (I): envolve a influência da densidade de corte na forma das curvas de partição, pois as separações a baixas densidades de cortes tendem a ser mais precisas que aquelas a altas densidades de corte. A imperfeição pode ser calculada a partir da equação (03) quando água é o meio de separação ou pela equação (04) quando é aplicado meio denso.

$$I = \frac{EPM}{(D50-1)} \quad (03)$$

$$I = \frac{EPM}{D50} \quad (04)$$

Alguns valores de imperfeição de equipamentos empregados em beneficiamento gravimétrico estão abaixo listados (Rubio, 1988):

Ciclones de meio denso: 0,01 a 0,03

Tanques de meio denso: 0,02 a 0,05

Jigues: 0,08 a 0,3

Mesa concentradora: 0,13 a 0,17

#### 4.4. RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE CARVÃO

Os rejeitos gerados no processo de beneficiamento do carvão são considerados resíduos do processo produtivo. Conforme Amaral Filho (2009), na mineração de carvão no Brasil, do material bruto retirado da mina, aproximadamente de 60% são resíduos. Estimativas dão conta de que já foram beneficiados aproximadamente 550 milhões de toneladas de carvão ROM nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, o que gerou cerca de 300 milhões de toneladas de resíduos sólidos”.

A região carbonífera de Santa Catarina, principalmente pelo volume de carvão extraído e as características de suas jazidas, que possuem maior quantidade de enxofre, é a que apresenta maiores transtornos relacionados aos rejeitos de carvão. A descoberta do carvão ocorreu em 1822 e sua extração se dava manualmente, o que possibilitava uma lavra seletiva. A partir da década de 40, com o surgimento da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), a exploração de carvão na região foi intensificada. Na década de 60 foi abandonada a mineração seletiva, quando foram instalados pré-lavadores nas bocas das minas para produzir o chamado "carvão pré-lavado", com o intuito de diminuir o teor de cinzas do carvão ROM. Durante várias décadas, a região carbonífera do Estado de Santa Catarina foi explorada sem os cuidados necessários à preservação do meio ambiente, causando um acúmulo de rejeitos e estéreis em toda a região, e, conseqüentemente, um imenso impacto ambiental comprometendo uma área superior a 5.000ha (AMARAL FILHO, 2009).

A extração do carvão mineral esteve sempre em evidência, tanto o carvão metalúrgico quanto o carvão energético, sendo a pirita relegada à condição de rejeito e não de matéria prima (PETERSON, 2008).

Conforme a Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT), através da (NBR 10004:2004), "resíduo sólido é todo material que em seu estado sólidos e semi sólido é resultante de atividade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Assim, para fins de gerenciamento de resíduos sólidos, estão incluídos lodos provenientes de sistemas de tratamento de águas e efluentes líquidos ou aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, que tornem inconveniente seu lançamento em redes públicas".

A Norma Brasileira (NBR 10004:2004) classifica os resíduos em:

- resíduos de classe I – Perigosos;
- resíduos de classe II – Não perigosos;
- resíduos de classe II A – Não inertes;
- resíduos de classe II B – Inertes.

Resíduos de classe I - Perigosos

É todo resíduo que apresenta riscos à saúde pública e ao meio ambiente, e também apresente características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

São considerados como resíduos sólidos tóxicos determinados resíduos do processamento industrial que apresentam, em teste de lixiviação, determinados elementos ou compostos acima de níveis fixados em normas ou regulamentos. Esses elementos ou compostos tóxicos, que conferem periculosidade ao resíduo são: cromo total, cádmio, mercúrio, chumbo, arsênio, bário, selênio, cianeto, prata, compostos organo-clorados, compostos organo-fosforados e produtos contendo bifenil-policlorado. A presença de alguns desses elementos ou compostos acima de certa concentração, no resíduo sólido, leva a considerá-lo como perigoso, ou seja, resíduo de classe I. (MARCELLO, 2013).

#### Resíduos de classe II – Não perigosos

São resíduos tais como, restos de alimento, sucatas de metais ferrosos e não ferrosos, papel e papelão, madeira, bagaço de cana dentre outros.

#### Resíduos de classe II A – Não inertes

São resíduos que não se enquadram como classe I - perigosos ou classe II B – Inertes, porém podem apresentar solubilidade em água, combustibilidade ou biodegradabilidade.

#### Resíduos de classe II B – Inertes

Segundo a NBR 10004:2004 “são todos os resíduos que, quando amostrados de forma representativa, que em contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões da potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor”.

Uma amostra de rejeitos de carvões de Santa Catarina foi caracterizada por Amaral Filho (2014) de acordo com a NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O resultado demonstrou que o material é classificado como resíduo classe II A - Não Inerte.

Um dos principais impactos ambientais promovidos pela mineração do carvão é a geração de drenagem ácida de mina – DAM, que por suas características contaminam as águas superficiais e subterrâneas, pois apresentam baixo pH, altos teores de metais, sulfatos e de outros compostos. Segundo World Coal Institute (2005), “a drenagem acida de minas é um efluente rico em metais, formado por reações químicas entre água, ar e rochas contendo minerais sulfetados”.

A drenagem ácida de mina mesmo depois de anos de encerradas as atividades mineradoras em uma região continua provocando grandes impactos ambientais no meio ambiente, pois continuam sendo geradas nas minas, sejam elas a céu aberto ou subterrâneas, e em depósitos de rejeitos (BORMA e SOARES, 2002).

Grande parte do problema acontece devido a falta de planejamento para o encerramento das atividades mineiras. O material exposto, rico em pirita, entra em contato com água e oxigênio, facilitando processos de oxidação da pirita e geração da DAM. A Figura 9 mostra as reações de oxidação da pirita e de geração da DAM.

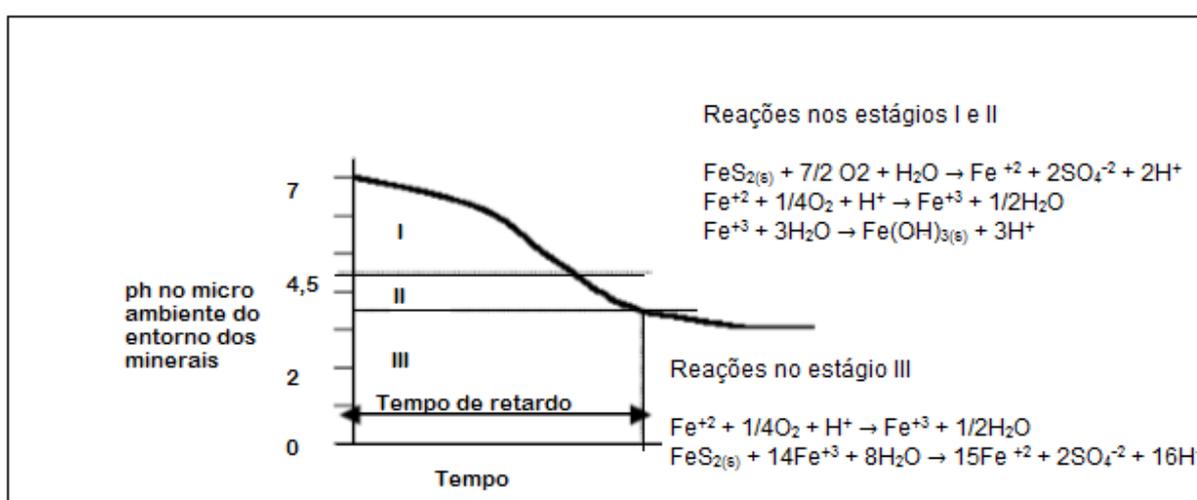


Figura 9: Reações do processo da produção de acidez proveniente da drenagem ácida (Stumm e Morgan, 1981 apud Maia, 2004).

Uma das maneiras de se verificar se um material vai gerar ou não a DAM é através dos métodos estáticos de contabilização de ácidos e bases. Estudos mostram que os testes estáticos são importantes indicadores da geração de acidez em células de depósitos de rejeito de carvão. Os testes estáticos são usados como um indicador preliminar para identificar os materiais que podem ter potencial de geração de acidez. Determinam o balanço entre os minerais potencialmente formadores de ácido e os potencialmente consumidores de ácido em uma amostra. Geralmente, os minerais que produzem ácido são os sulfetos reativos e os minerais consumidores de ácido geralmente são os carbonatos primários. Mesmo assim hidróxidos, silicatos e argilas são capazes de fornecer potencial de neutralização (Kontopoulos, 1998).

Se o resíduo for potencialmente gerador de ácido, este precisará de um método de disposição adequado para prevenir ou mitigar os impactos no entorno (Lawrence e Scheske, 1997; Price et al., 1997).

Um teste de contabilização de ácidos e bases foi desenvolvido em 1974 para avaliar a geração de acidez por rejeitos de carvão e foi aperfeiçoado por Sobek et al. em 1978 (EPA, 1994). De acordo com esse teste, o potencial de produção de ácido (AP) é determinado a partir da quantidade de enxofre total. Assume que dois mols de ácido serão formados por um mol de enxofre. A unidade para AP é dada em quilogramas de carbonato de cálcio por tonelada de rocha.

O potencial de neutralização (NP) é determinado primeiro pelo teste “fizz” (Tabela 3) para selecionar a força do ácido a ser usado na próxima etapa. Baseado nesta informação, uma solução de ácido clorídrico é adicionado à amostra e esta é fervida por um período de 1 h. A solução é titulada até pH 7 com hidróxido de sódio para determinar a quantidade de ácido consumido na reação entre o HCl e a amostra.

Tabela 3. Volume e normalidade de ácido hidrocloreídrico usado por cada intensidade do teste “fizz” (EPA, 1994).

Fonte: autor

Teste “fizz”	HCl	
	(mL)	(normalidade)
Nenhum	20	0,1
Fraco	40	0,1
Moderado	40	0,5
Forte	80	0,5

O potencial líquido de neutralização (NNP - net neutralization potential) é determinado pela subtração de AP pelo NP e é uma medida da diferença entre os potenciais de geração de acidez e neutralização. O valor pode ser tanto positivo quanto negativo. Testes conduzidos por Ferguson (descritos por Lapakko, 1992) indicam que valores de NNP menores que - 20 kg CaCO<sub>3</sub>/ton são provavelmente formadores de ácido. Aqueles com valores de NNP maiores que +20 kg CaCO<sub>3</sub>/ton provavelmente não são formadores de ácido. Finalmente, para valores de NNP entre -20 e +20 kg CaCO<sub>3</sub>/ton, é difícil prever o potencial de geração de acidez.

Neste teste pressupõe-se que todo o enxofre da amostra é reativo. Esta hipótese não leva em consideração a presença de gipso e outros minerais sulfatados não reativos. Outra limitação da técnica é a possibilidade de superestimar o NNP das seguintes formas: (i) o uso de um ácido muito forte pode dissolver materiais que não

reagiriam para manter o pH da drenagem dentro de um nível ambientalmente aceito (se o pH da amostra não estiver entre 0,5 e 1,8, a verificação do teste “fizz” é necessária novamente); (ii) o uso de ácido fervido pode causar uma superestimação no NP por reagir com carbonatos de ferro e manganês, o qual não seria influenciado em um estado natural de NP (esta observação é problemática com amostras que contém elevadas quantidades destes carbonatos); (iii) o NP pode ser subestimado pela contribuição de hidróxidos metálicos que precipitam durante a titulação com hidróxido de sódio.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental deste trabalho consistiu na caracterização de uma espiral, equipamento de beneficiamento gravimétrico de finos de carvão mineral, que opera no Estado de Santa Catarina na Camada Barro Branco. Os dados de processo são da Mina de Verdinho, Município de Forquilha – SC, e as análises foram realizadas no LAEC – Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão.

### 5.1 FLUXOGRAMA DA USINA

A Usina de Beneficiamento de Carvão Mineral instalada na Unidade Mineira II (UM - II) – Verdinho tem seus processos divididos em três etapas: planta de britagem, circuito de grossos e circuito de finos. Os dados abaixo foram fornecidos pela Carbonífera Criciúma S.A. (CCSA, 2014).

#### 5.1.1 Classificação e Britagem

Partículas finas são geradas num primeiro momento no processo de desmonte empregado na lavra, compondo um montante de finos (partículas menores do que 1 mm) do ROM. Secundariamente, são gerados finos no processo de britagem, partículas também com diâmetro menor que 1 mm.

Como o minério lavrado não é homogêneo, as características do carvão propriamente dito apresentam variações em função do condicionamento geológico da jazida Barro Branco em exploração, o que define a qualidade do minério a ser beneficiado. Assim, a primeira etapa por que passa o minério extraído na UM II consiste na homogeneização granulométrica por peneiras de duplo “deck” (com scalping). A fração retida em  $\varnothing > 4''$  é encaminhada para um britador de mandíbula fabricação PIACENTINI, modelo BM 800. O produto destes está na faixa entre  $1\frac{1}{2}''$  a  $0,03''$  ( $\pm 93\%$ ) conforme indicado na Figura 10.

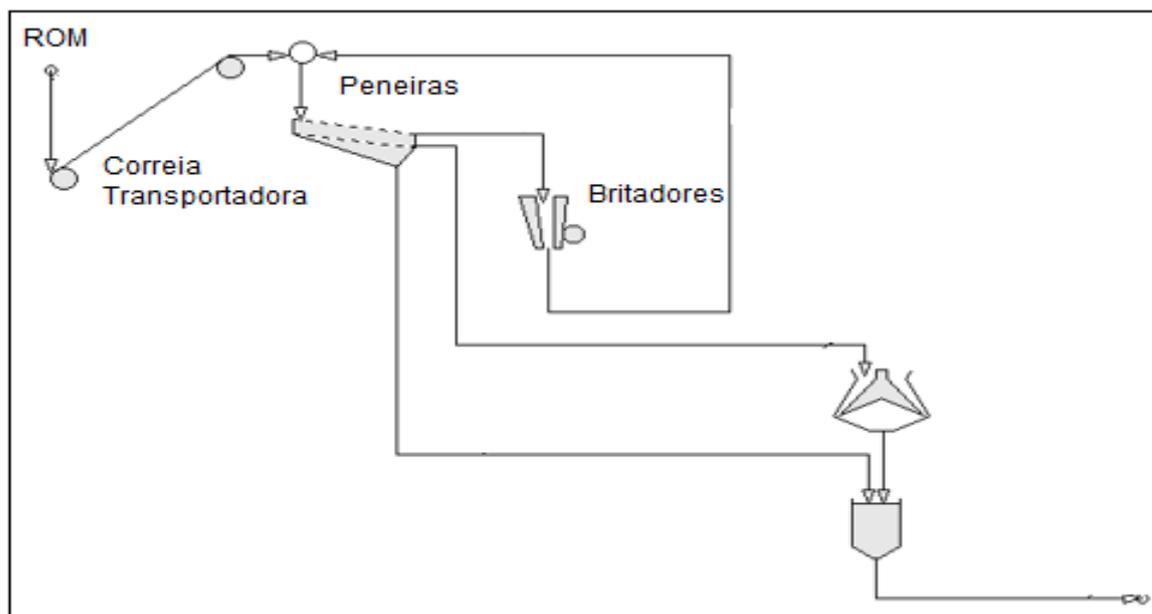


Figura 10: Fluxograma de britagem do ROM.  
Fonte: autor

O minério com  $\varnothing < 1\frac{1}{2}$ " é direcionado diretamente para o túnel de alimentação da usina (lavador de carvão), ao passo que as frações superiores são conduzidas por correia a um par de britadores cônicos da marca "Telsmith"- modelo 48 FC, que tem a função de reduzir o tamanho dos grãos a faixa inferior a  $1\frac{1}{2}$ ". O produto do circuito de britagem é estocado na pilha de alimentação com capacidade para 2.500 t de minério britado, situada sobre túnel alimentador do lavador.

### 5.1.2 Concentração Mineral

O processo de concentração, ou beneficiamento mineral propriamente dito, dá-se após o transporte do minério britado ao silo com capacidade para 60 t, a partir do qual esta planta é alimentada. A usina é dotada de dois circuitos destinados a separação sólido-sólido por via úmida:

- ✓ **Circuito de finos** ( $\varnothing < 0,03$ " - 60 t/h), constituído por um conjunto de ciclones autógenos responsáveis pela distribuição dos finos nas diferentes rotas de concentração, a saber: flotação (overflow  $\varnothing < 0,01$ ") e espirais (underflow  $\varnothing 0,01$ " a  $0,04$ " );
- ✓ **Circuito de grossos** ( $1\frac{1}{2}$ " a  $0,04$ " - 600 t/h), constituído de um "jig" (modelo "Kopex") com capacidade para 2 x 300 ton/h (leito duplo) para separação gravimétrica via úmida;

Parte dos materiais finos gerados durante o processo de jigagem, assim como aqueles oriundos do conjunto de peneiras desaguadoras (passante), é recirculada para o sistema de finos.

### 5.1.3 Fluxograma Circuito de Grossos

O carvão britado é conduzido na vazão mássica de 600 t/h a um silo alimentador responsável pela alimentação de todo o circuito, iniciando por uma peneira curva (*sievebend*) com abertura nominal de 0,05", sendo a fração passante encaminhada ao Tanque C do circuito de finos. O material retido segue no rumo do Jig KOPEX que conta com três compartimentos em série, respectivamente associados aos compartimentos dos rejeitos R1, R2 e R3 gerados no processo de jigagem. Os dados do circuito de grossos estão apresentados na Figura 11.

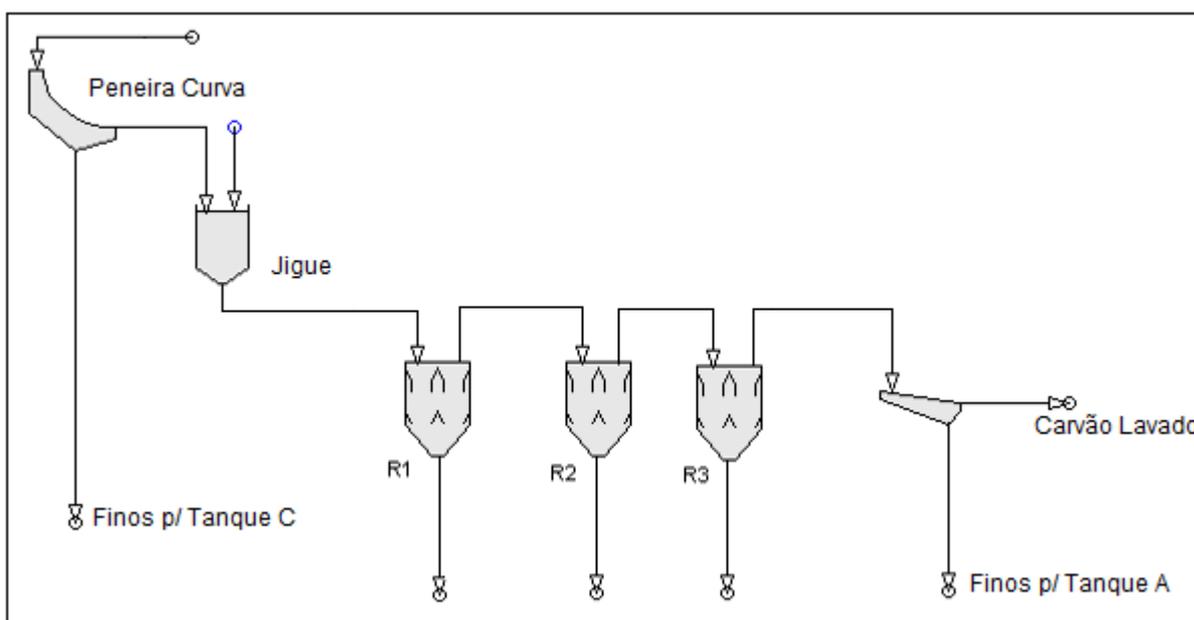


Figura 11: Fluxograma do circuito de grossos.

Fonte: autor

O carvão lavado é peneirado e desaguado em peneiras com abertura de 0,04". O retido nas peneiras desaguadoras, com aproximadamente 43% de cinzas e uma recuperação mássica em torno de 33%, é encaminhado para as pilhas de carvão lavado. Os passantes das peneiras desaguadoras são direcionados ao tanque A que por sua vez alimenta o tanque C do circuito de finos.

### 5.1.4 Fluxograma Circuito de Finos

O circuito de finos da UM II é definido pelo fluxo de materiais passantes na peneira curva instalada na alimentação do jigue, que são captados por um tanque homogeneizador (tanque C), que também recebe a deslamagem das peneiras desaguadoras do carvão grosso lavado. Este também é alimentada pelos refluxos de bombeamento da água de jigagem (tanque A), onde também circula material fino.

Do ponto de vista de processo o conceito da planta de finos é simples, sendo os finos captados no tanque C bombeados para a bateria de hidrociclones classificadores (WOC), gerando duas faixas granulométricas distintas:

- A fração fina ( $- 0,04''$  a  $+ 3,94 \times 10^{-3}''$ ), *underflow*, é direcionada para os conjuntos de espirais montados nos andares inferiores;
- A fração ultrafina ( $-3,94 \times 10^{-3}''$ ), *overflow*, é direcionada para as células de flotação;

O fluxograma de finos mostrado na Figura 12 é constituído por ciclones WOC (*wateronlycyclone*), espirais, peneiras e um banco de flotação. Todo o material que alimenta o circuito de espirais é proveniente do *undersize* dos WOC, enquanto o *overflow* alimenta o banco de células de flotação.

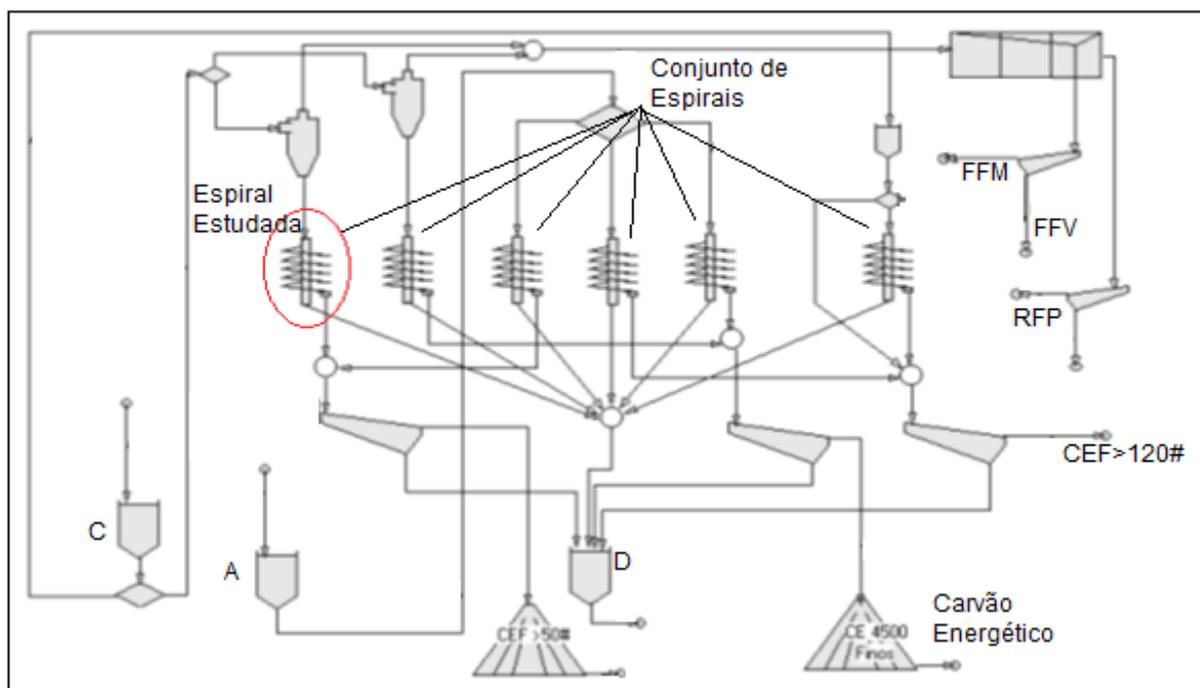


Figura 12: Fluxograma do circuito de finos de carvão da UM II. Espiral em destaque foi a espiral estudada. Fonte: CCSA, 2013.

## 5.2. ESPIRAIS

As espirais empregadas na Mina do Verدينho foram produzidas pelo fabricante Riofibras da cidade de Siderópolis em Santa Catarina, cujos dados estão informados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados técnicos das espirais empregadas na Mina do Verدينho da Carbonífera Criciúma S.A.

Modelo	5II-900
Altura (mm)	1700
Diámetro (mm)	700
Peso (kg)	70
Passo (mm)	250
Angulo (°)	25
Capacidade (t/h)	4,8 – 1,2

## 5.3 AMOSTRAGEM

A coleta das amostras, da alimentação do sistema de espirais, do concentrado de pirita e do concentrado de carvão na saída do sistema, foram realizadas em dias típicos de operação da planta de beneficiamento. Foram realizadas quatro coletas num período de um ano, sempre no período da manhã. A massa coletada nas quatro amostragens foi de aproximadamente 20 kg de amostra.

A amostragem foi realizada na alimentação e nos produtos da espiral: concentrado de carvão e rejeito. Calcularam-se as massas e os teores da alimentação através de um balanço de massa. A Figura 13 ilustra esquematicamente uma espiral utilizada no beneficiamento do carvão e os detalhes da entrada do material e saída dos produtos.

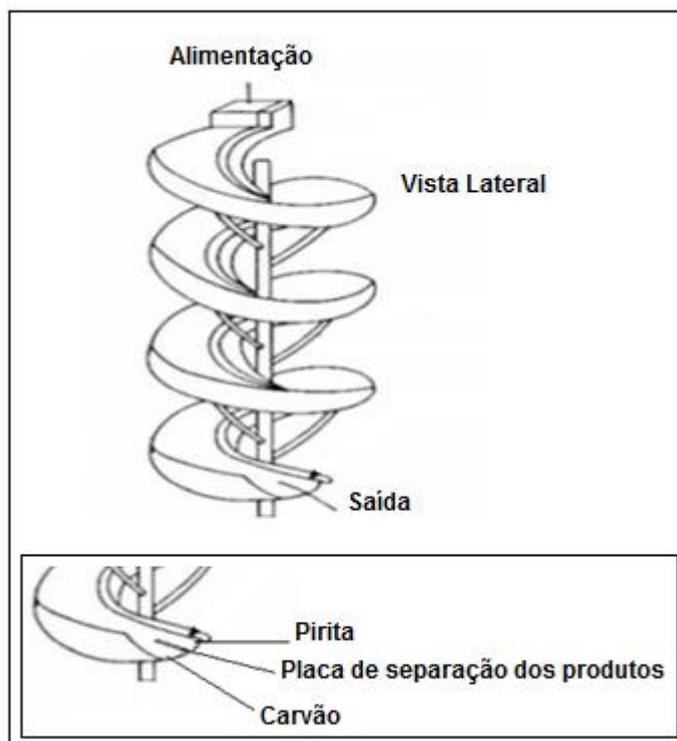


Figura 13: Desenho esquemático da espiral mostrando a operação normal.  
Fonte: autor, 2014.

#### 5.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Baseou-se no peneiramento da amostra através de peneiras padronizadas, objetivando a separação das partículas de acordo com o seu tamanho, seguindo a seguinte ordem de peneiras: 2,00, 1,00, 0,50, 0,25 e 0,149 mm.

Após secagem, em torno de 60 min, a amostra foi transferida para um conjunto de peneiras previamente montado, com as malhas solicitadas em ordem decrescente de abertura. Assim a amostra foi depositada no topo das peneiras e sofreu agitação constante até que todas as menores partículas passassem através das malhas. Feito isso todas as frações retidas em cada malha foram pesadas para fins de cálculo de granulometria conforme NBR 8629 (ABNT, 1984a).

#### 5.5 ANÁLISES DENSIMÉTRICAS

A separação por meios densos dos rejeitos (afunda-flutua) foi realizada conforme a NBR 8738 (ABNT, 1984b), nas densidades relativas de 1,4, 1,6, 1,8, 2,0, 2,2, 2,4, 2,6 e 2,8 g/cm<sup>3</sup>. O objetivo do procedimento foi obter dados para traçar as curvas de separabilidade densimétrica nos intervalos granulométricos de “2,0 a 0,1 mm” (finos).

Os líquidos densos orgânicos utilizados no ensaio foram o tribromometano (também denominado bromofórmio), com densidade relativa de  $2,8 \text{ g/cm}^3$  e fórmula química  $\text{CHBr}_3$ , e o tetracloroetileno (ou percloroetileno), com densidade relativa  $1,6 \text{ g/cm}^3$  e fórmula  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ . Para diluição dos líquidos densos, com a intenção de se obter as densidades relativas desejadas, utilizou-se o solvente orgânico xileno ( $\text{C}_8\text{H}_{10}$ ), de densidade relativa  $0,8 \text{ g/cm}^3$ . A preparação dos meios densos se dava, quando necessário, através de uma mistura destes líquidos. Após a preparação do meio denso, foram realizados os ensaios de afunda-flutua em todas as amostras. Para a realização destes ensaios foram utilizados os seguintes materiais: béquer 1000mL (de polipropileno e de vidro), papel filtro, funil, escumadeira, bastão de vidro e balança com capacidade para 5 kg.

As amostras foram quarteadas, reduzindo as mesmas a uma massa de aproximadamente 500 g cada uma. Cada amostra foi imersa inicialmente no recipiente contendo o meio denso de menor densidade, neste caso o meio com densidade relativa de  $1,4 \text{ g/cm}^3$ . Um bastão de vidro foi usado para auxiliar na separação e liberar as partículas aderidas na parede do béquer. A fração que flutuou foi retirada com o auxílio de uma escumadeira da superfície do líquido, e despejada em um funil forrado com papel filtro. A fração afundada no meio denso também foi separada do líquido orgânico. Em ambos os casos, deixou-se o meio denso escorrer em um papel filtro, para futura reutilização. Ambas as frações (flutuadas e afundadas) foram secas à temperatura ambiente para evaporação do líquido orgânico. O material afundado na densidade anterior (inferior) foi novamente imerso em recipiente contendo o líquido denso na densidade imediatamente superior, neste caso a densidade relativa de 1,6. O material flutuado foi removido como no procedimento anterior e seco. O afundado foi retirado do fundo do recipiente e posteriormente seco. Esse procedimento foi repetido nas demais densidades até atingir a densidade relativa máxima do ensaio:  $2,8 \text{ g/cm}^3$ . As frações flutuadas nas densidades relativas de 1,4 a  $2,8 \text{ g/cm}^3$ , juntamente com a porção afundada em 2,8, foram pesadas e calculadas suas participações na massa total. Os resultados obtidos foram transcritos em planilhas eletrônicas para os cálculos e desenho das curvas de separabilidade densimétrica, também chamadas de “curvas de lavabilidade”.

## 5.6 ELABORAÇÃO DAS CURVAS DE LAVABILIDADE

As curvas de lavabilidade de Henry-Renhardt (curva dos flutuados, curva dos

afundados, curva densimétrica e curva NGM) foram elaboradas a partir dos resultados dos ensaios de separação densimétrica em meios orgânicos e das análises de cinzas e enxofre e total. Tais curvas foram desenhadas tanto em função do teor de cinzas quanto em função do teor de enxofre total para o material de alimentação das espirais. Estas curvas foram utilizadas para um melhor entendimento dos parâmetros teóricos de recuperação em cada faixa densimétrica estudada.

## 5.7 ELABORAÇÃO DA CURVA DE PARTIÇÃO

A curva de partição foi elaborada a partir dos resultados dos ensaios de separação densimétrica em meios orgânicos e das massas de concentrado e rejeito.

Através da curva de partição verificou-se a eficiência do sistema. O tamanho de separação ou “tamanho de corte” foi obtido com a probabilidade de 50%, ou seja, igual chance da partícula ficar no concentrado ou rejeito. A eficiência de separação foi avaliada pelos parâmetros EPM e área de erro (I), conforme descrito no item 4.3.

## 5.8 CARACTERIZAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO, CONCENTRADO E PRODUTOS

As análises realizadas para a caracterização tecnológica e ambiental dos materiais estão descritas a seguir. Todas as análises foram realizadas em duplicata. Medidas da área superficial foram realizadas em quadriplicata.

### 5.8.1 Análise Imediata

Para a análise imediata e elementar as amostras foram cominuídas em um moinho de disco orbital de forma a passar em uma peneira com abertura (quadrada) de 0,25 mm (Tyler #60). Na análise imediata foram determinados os teores de cinzas de acordo com a NBR 8289 (ABNT, 1983a), matéria volátil de acordo com a NBR 8290 (ABNT, 1983b) e carbono fixo de acordo com a NBR 8299 (ABNT, 1983d). Também se analisou a umidade, conforme a NBR 8293 (ABNT, 1983c), para converter os valores de cinzas, matéria volátil e carbono fixo para base seca.



Figura 14: Peneirador utilizado na análise granulométrica das amostras.  
Fonte: Autor.

### 5.8.2 Enxofre Total

A análise de enxofre total foi realizada no equipamento LECO CHN 628 Séries S, “Sulfur”. O método consiste na queima da amostra em forno LECO e análise através de raios infravermelhos, após a pesagem de uma massa de amostra em torno de 0,200 a 0,250 g em “navícula” de porcelana. O equipamento opera a uma temperatura de 1350°C ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ), com uma pressão de oxigênio regulada em 40PSI  $\pm 10\%$ , conforme Manual do Equipamento.

### 5.8.3 Poder Calorífico Superior

O poder calorífico foi medido em uma Bomba Calorimétrica AC 500 da Leco. O procedimento consiste em quantificar a energia liberada na forma de calor e da energia gasta na vaporização da água que se forma numa reação de oxidação de uma amostra. O método baseia-se na combustão de uma amostra sob uma atmosfera de oxigênio em uma bomba calorimétrica. Assim, colocou-se uma quantidade de água conhecida e com uma temperatura pré-definida em um cilindro onde, posteriormente, foi monitorado o acréscimo da temperatura dessa água devido a combustão. O valor real foi então comparado com uma amostra de referência (ácido benóico) e expresso em kcal/kg. Para otimizar o processo de combustão, o cilindro foi preenchido com oxigênio puro (99,95%) em uma pressão de 30 bar.

#### 5.8.4 Predição da geração de acidez pela contabilização de ácidos e bases

Para a avaliação do potencial de geração de acidez das amostras foram realizados ensaios estáticos de contabilização de ácidos e bases conforme descrito em Sobek et al (1978) e EPA (1994).

Os ensaios estáticos foram realizados no rejeito bruto e na amostra de densidade intermediária (entre 2,2 e 2,7). Empregou-se o método de contabilização de ácidos e bases tradicional (ABA). O método é baseado na determinação do potencial de geração de acidez (AP) e no potencial de neutralização (NP) dos materiais. Com estes valores, pode-se calcular o potencial de neutralização líquido (NNP), equação 10.

$$\text{NNP} = \text{NP} - \text{AP} \quad (10)$$

A determinação do potencial de acidez (AP) foi realizada pela análise de enxofre total, via instrumental no equipamento LECO – CHN628, Séries S, “SULFUR”. Estequiometricamente, um mol de  $\text{CaCO}_3$  é requerido por mol de S (equação 11):

$$\text{AP (kg CaCO}_3\text{/t)} = (1000/32) \cdot \%S \quad (11)$$

A determinação do potencial de neutralização (NP) foi realizada pelo ataque da amostra com ácido clorídrico aquecido a  $90^\circ\text{C}$ , por 1 hora, para consumir os minerais neutralizantes, seguido de titulação com NaOH até pH 7,0. O cálculo do NP foi realizado pelas equações 12 a 14:

$$C = \frac{\text{mL NaOH}}{\text{mL HCl}} \quad (12)$$

$$\text{Eq ácido consumido} = (\text{ml ácido adicionado}) - (\text{ml base adicionado}) \times C \quad (13)$$

$$\text{NP} = (\text{Eq ácido cons}) \times 25 \times (\text{N ácido}) \quad (14)$$

Onde: C = constante; N = normalidade

De acordo com o método, o valor do NNP permite enquadrar o material nas seguintes situações:

- valores de NNP menores que - 20 indicam que haverá a formação de ácido;
- valores de NNP maiores que + 20 indicam que não haverá a formação de ácido;
- valores de NNP entre -20 e +20 indicam que é difícil prever a formação ou não de ácido.

### 5.8.5 Medição da Área Superficial

A área superficial do rejeito das espirais foi medida pelo método de adsorção do composto orgânico éter mono etílico do etileno glicol (EMEG) (HEILMAN et al, 1965).

Baseia-se na retenção de líquidos polares. A quantidade de éter mono etílico do etileno glicol (EMEG), que está sendo evaporado diminui quando não mais existe EMEG livre e somente resta aquele adsorvido formando uma camada monomolecular. A quantidade de EMEG existente neste momento é proporcional à superfície do sólido. Nestas condições a cada 0.000286g do EMEG corresponde a uma camada monomolecular de um metro quadrado de argila, (um m<sup>2</sup>).

### 5.9 PARAMETROS DE EXIGENCIA DA USINA JORGE LACERDA

A usina geradora de energia no sul de Santa Catarina, a Termoelétrica Jorge Lacerda, que emprega como combustível para a geração de energia o carvão mineral, exige das mineradoras fornecedoras de carvão as seguintes características para sua queima (Tabela 5):

Tabela 5: Parâmetros de exigência da usina de geração de energia Jorge Lacerda.

Parâmetro	Máximo
Cz(%)	44,0
S (%)	2,3
Parâmetro	Mínimo
M.V.(%)	20,0
PCS (cal/g)	4450,0
Parâmetro	Máximo
Granulometria	10% > 25,4 mm
	15% < 0,6 mm

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta informações sobre o funcionamento das espirais. Caracterizaram-se os fluxos da alimentação e saída (concentrado e rejeito) e determinaram-se dados de eficiência do processo. Ao final, parâmetros ambientais foram quantificados.

### 6.1 DADOS GERAIS DE PROCESSO

A Tabela 6 apresenta as massas e resultados das análises de cinzas, matéria volátil, carbono fixo, enxofre total e poder calorífico superior da alimentação e produtos (concentrado e rejeitos) em quatro momentos aleatórios de funcionamento das espirais. Sendo as quatro coletas realizadas nas seguintes datas: 11/04/2013, 02/05/2013, 05/09/2013 e 01/04/2014.

Tabela 6: Resultados da análise imediata da alimentação e produtos de uma espiral empregada no beneficiamento de finos de carvão da Camada Barro Branco em 4 amostras.

Parâmetro	Data				Média	Desvio P.
	11/04/13	02/05/13	05/09/13	01/04/14		
Alimentação						
Massa (%)	100	100	100	100	100	0,00
Cz (%)	68,1	68,7	63,5	69,5	67,5	2,3
M.V. (%)	19,4	15,6	16,9	15,5	16,8	1,5
C.Fx. (%)	12,4	15,6	19,5	14,9	15,6	2,5
S (%)	6,2	5,4	4,2	4,8	5,2	0,7
PCS (cal/g)	2163,0	2179,0	2803,0	2363,0	2377,0	258,2
Concentrado						
Massa (%)	42,6	25,8	55,6	35,0	39,7	10,9
Cz (%)	60,0	41,9	49,8	50,3	50,5	6,4
M.V. (%)	21,0	21,4	19,7	19,9	20,5	0,7
C.Fx. (%)	18,9	36,6	30,4	29,7	28,9	6,3
S (%)	2,9	1,3	1,3	1,4	1,7	0,6
PCS (cal/g)	3023,0	4703,0	4071,0	4116,0	3978,0	605,25
Rejeito						
Massa (%)	57,3	74,2	44,3	64,9	60,2	10,9
Cz (%)	74,2	78,1	80,7	79,9	78,2	2,5
M.V. (%)	19,5	13,5	13,3	13,1	14,9	2,6
C.Fx. (%)	6,2	8,3	5,8	6,9	6,8	0,9
S (%)	8,7	6,9	7,7	6,6	7,5	0,8
PCS (cal/g)	1523,0	1300,0	1214,0	1418,0	1364,0	117,0

Ao compararem-se as especificações exigidas pela termoelétrica e os valores das quatro amostras, percebe-se que apenas uma das quatro amostras atende as especificações – o concentrado do dia 02/05/2015. Porém, a recuperação mássica foi

de apenas 25%.

Em valores médios, a alimentação apresenta um teor de cinzas de 67,5%, um teor de enxofre de 5,2% e um poder calorífico superior de 2377,0 cal/g. O concentrado apresentou um teor de cinzas de 50,5%, um teor de enxofre de 1,76% e um poder calorífico superior de 3978,0 cal/g; enquanto que o rejeito um teor de cinzas 78,2%, um teor de enxofre de 7,5% e um poder calorífico superior de 1364,0 cal/g. A recuperação mássica do concentrado é de aproximadamente 40%. Assim, em termos médios, o concentrado atende as especificações em relação ao teor de enxofre e matéria volátil e não atende as especificações de cinzas e poder calorífico.

Na mina em questão, os equipamentos estão ajustados, manualmente, para produzir concentrados com recuperações mássicas maiores, mesmo que haja certo prejuízo na qualidade. O concentrado das espirais consegue destinação uma vez que é misturado a carvões de melhor qualidade produzidos pela mesma ou outras mineradoras.

Além dos parâmetros citados acima, também a granulometria tem exigência para uso na Usina Termoelétrica. O material deve estar predominantemente na faixa granulométrica entre 0,6 mm e 25,4 mm, com um máximo de 10% de material com granulometria acima de 25,4 mm e máximo de 15% de material com granulometria inferior a 0,6 mm.

A Tabela 7 apresenta os dados e a Figura 14 o gráfico da análise granulométrica da alimentação e dos produtos. A alimentação, e seus produtos, tem granulometria inferior a 2,0 mm. Como esperado, o concentrado apresenta grãos mais grossos do que o rejeito. O  $D_{50}$  da alimentação é de 0,44 mm, o  $D_{50}$  do concentrado é 0,53 mm e o  $D_{50}$  do rejeito é 0,37 mm. A maior parte das partículas do concentrado – intervalo entre  $D_{10}$  e  $D_{90}$  – fica entre 0,1 e 1,3 mm. Também, em relação ao concentrado, aproximadamente 60% do material encontra-se na faixa granulométrica abaixo de 0,6 mm, sendo encaminhado para a usina após misturado com outros carvões da Carbonífera Criciúma ou de outras mineradoras com granulometria superior, atendendo dessa forma as especificações da usina.

Tabela 7: Análise granulométrica da alimentação e dos produtos.

Faixa granul. (mm)	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)
>2,00	0,3	0,4	0,3
2,00-1,00	11,3	14,9	7,9
1,00-0,50	32,3	37,6	28,6
0,50-0,25	27,7	25,9	29,8
0,25-0,149	13,0	7,3	18,2
<0,149	15,4	13,9	15,2
$\Sigma$	100,0	100,0	100,0

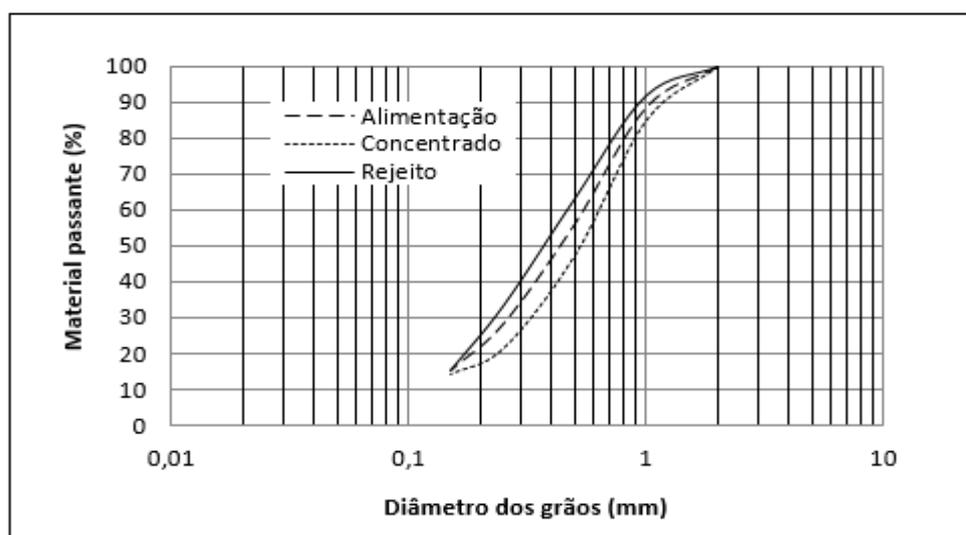


Figura15: Distribuição granulométrica da alimentação, concentrado e rejeito de uma amostra de carvão beneficiada em uma espiral coletada em 01/04/2014.

Fonte: autor

## 6.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE ALIMENTAÇÃO

A Tabela 8 apresenta os resultados da análise granuloquímica do material de alimentação da amostra de 01/04/2014. Os menores teores de cinzas e enxofre concentram-se nas frações mais grossas e os maiores teores de cinza e enxofre nas frações mais finas. Reconstituindo todas as frações, o material apresenta 66,84% de cinzas e 3,72% de enxofre.

Tabela 8: Análise granuloquímica da alimentação das espirais.

Faixa granul. (mm)	Massa (%)	Cz (%)	S (%)	Massa Acum. (%)	CzAcum. (%)	S Acum. (%)
> 2,00	0,2	* Desc.	* Desc.	0,2	55,2	1,5
2,00- 1,00	11,2	55,2	1,5	11,4	55,2	1,5
1,00 - 0,50	32,2	59,3	2,6	43,7	58,2	2,3
0,50 - 0,25	27,7	66,9	4,1	71,4	61,6	3,0
0,25 - 0,149	13,0	80,0	5,7	84,5	64,5	3,4
< 0,149	15,4	79,6	5,1	100,0	66,8	3,7
Total	100,00					

\* Desconsiderado por não apresentar volume suficiente de amostra para preparação.

A Tabela 9 apresenta os resultados da análise densimétrica do material de alimentação da amostra de 01/04/2014. Como esperado, quanto menor a densidade, menor o teor de cinzas do material. Essa tendência crescente nos teores de cinzas inicia com a densidade relativa menor que 1,4, que apresenta um teor de cinza igual a 14,0%, e finaliza com a densidade entre 2,6 e 2,8 com um teor de cinza 94,1%. Na faixa densimétrica superior a 2,8 o teor de cinzas é de 70,6 % em virtude da decomposição térmica da pirita. O teor de enxofre, por sua vez, é de aproximadamente 1% em todas as faixas densimétricas, com exceção da densidade acima de 2,8 cujo teor é de 32,8%. Ainda, em relação ao S, a fração 2,80 corresponde a 75,9 % da massa total de S analisada, restando 24,0% da massa para as outras 8 faixas densimétricas. Reconstituindo todas as frações, o material apresenta 64,5% de cinzas e 3,3% de enxofre.

Tabela 9: Análise densimétrica da alimentação das espirais.

Faixa dens.	Massa (%)	Cz (%)	S (%)	Massa Acum. (%)	CzAcum. (%)	S Acum (%)
< 1,40	10,8	14,0	1,1	10,8	14,0	1,1
1,40-1,60	12,7	30,5	1,1	23,5	22,9	1,1
1,60-1,80	9,2	39,8	1,3	32,8	27,7	1,2
1,80-2,00	6,5	57,0	1,6	39,4	32,6	1,2
2,00-2,20	7,4	70,7	1,6	46,8	38,6	1,3
2,20-2,40	8,9	80,6	1,2	55,7	45,3	1,3
2,40-2,60	22,7	90,5	0,8	78,4	58,4	1,2
2,60-2,80	14,6	94,1	1,0	93,1	64,0	1,1
> 2,80	6,8	70,6	32,8	100,0	64,5	3,3
Total	100,0			100,00		

A Figura 15 mostra as curvas de lavabilidade construídas a partir dos dados da tabela 9. Pode-se observar que, considerando uma situação ideal para atender as exigências da Termoelétrica Jorge Lacerda (44% Cz e 2,3 % S), a densidade de corte deve ser de aproximadamente 2,3 ( $d_c = 2,3$ ) com uma recuperação mássica de 55% no flutuado. Nesta condição o teor de cinzas deveria ficar em 44% e o teor de S em 1%. Essa condição não é alcançada no dia 01/04/2014 e nem na média das 4 amostras apresentadas na Tabela 3. No dia 01/04/2014, a massa flutuada foi de 35,0%, o teor de cinzas de 50,32% e o teor S de 1,47%. Na média das 4 amostras, a massa flutuada foi de 39,7%, o teor de cinzas de 50,52% e o teor de S de 1,76%.

Uma possível explicação para o baixo desempenho poderia ser a pouca liberação entre as partículas carvão/ganga ou carvão+rocha/pirita. Em relação a liberação do carvão, sabe-se da dificuldade nas jazidas brasileiras, que contém

matéria mineral intrinsicamente contida nas rochas. Em relação a pirita, estudos realizados verificaram que somente 50% da pirita está liberada em torno de 0,5 mm. Os demais 50% de pirita estão distribuídos em partículas com alto teor de pirita, nas classes 80 a 90% e 90 a 100%, ou seja, nas classes de partículas ditas “quase” liberadas. Contudo, como a granulometria das espirais é de  $< 2,00$ , o nível de liberação ainda é parcial (Schneider e Norbert, 2011).

Outra razão deste baixo desempenho pode ser explicada pelo valor do NGM (“near gravity material”). Pode-se verificar que na densidade de corte de 2,3 esse valor chega a um valor muito alto (aproximadamente 30%). Aliás, esse valor passa de 20% na densidade de 2,1 para quase 40% na densidade de 2,5. Isso quer dizer que o material é de difícil separação, sugerindo a necessidade da utilização de equipamentos mais precisos que as espirais para este fim.

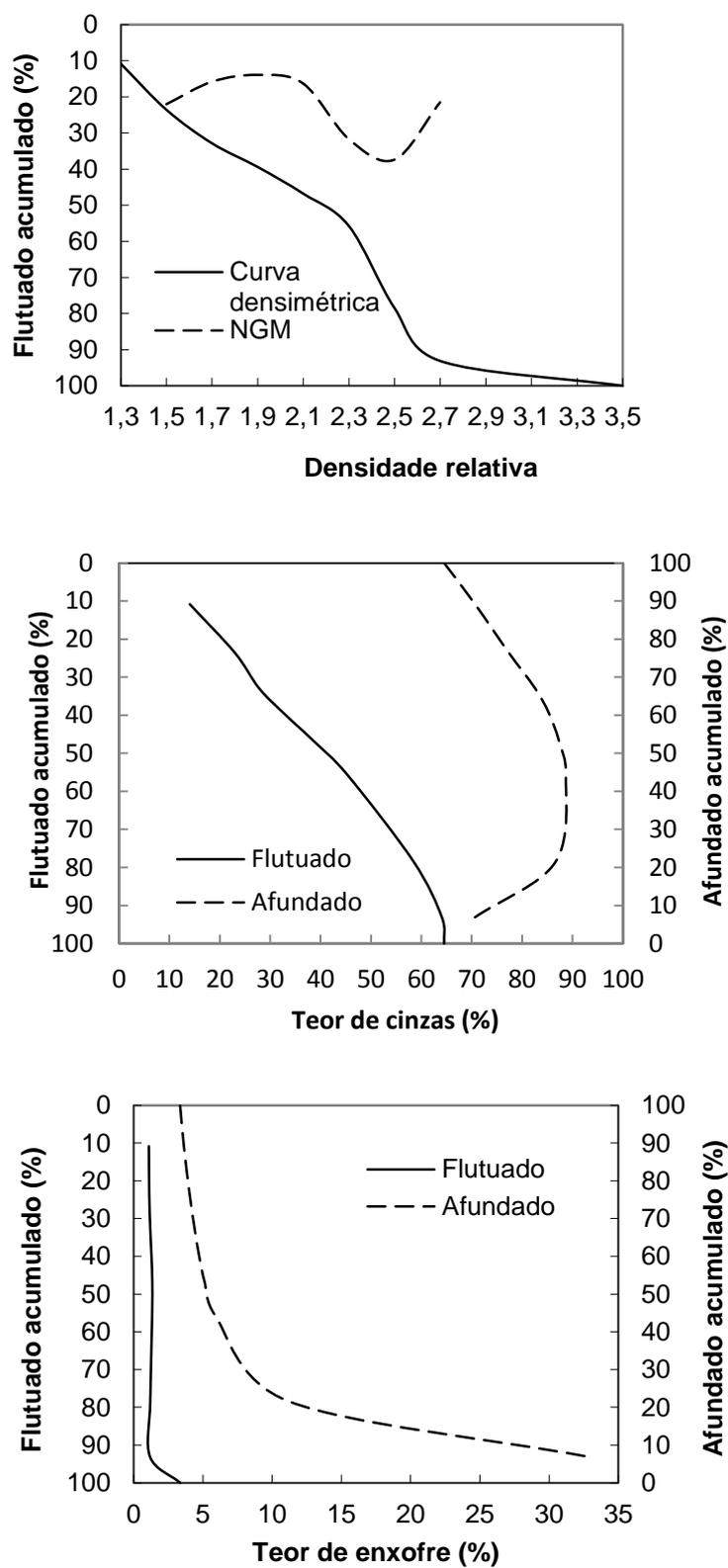


Figura 16. Curvas de separabilidade densimétrica da alimentação da espiral beneficiando o carvão da camada Barro Branco de Santa Catarina.

### 6.3 EFICIÊNCIA DO PROCESSO

A Figura 32 apresenta a Curva de Tromp (Curva de Partição) da espiral em estudos, com dados dos produtos do dia 01/04/2014. Pode-se observar o formato esperado, típico “S”, e que a densidade relativa para o coeficiente de partição é de aproximadamente 2,0.

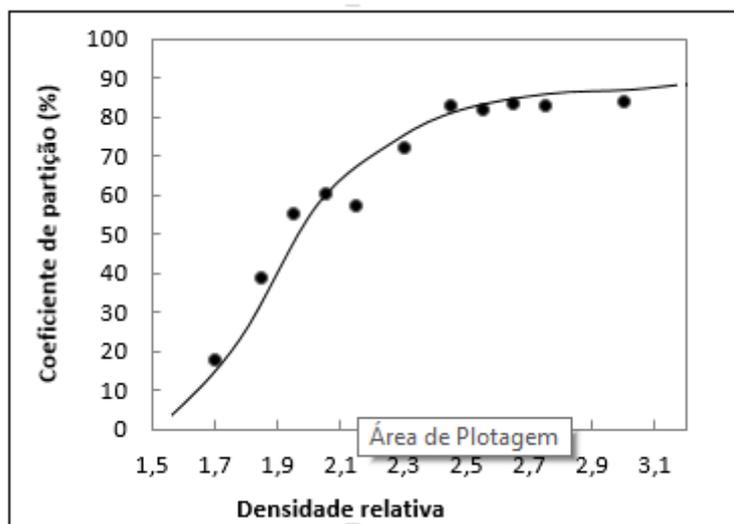


Figura 17: Curva de Tromp da espiral estudada no beneficiamento do carvão da camada Barro Branco em Santa Catarina.

A Tabela 10 mostra alguns parâmetros derivados da curva de partição – Densidade de Corte ( $D_{50}$ ), Desvio Provável Médio (EPM), Imperfeição (I) e a Área de Erro.

Tabela 10: Parâmetros derivados da curva de partição da espiral estudada.

Parâmetro	Resultado
$D_{50}$	2,0
EPM	0,3
I	0,3
Área de erro	178,13 cm <sup>2</sup>

Todos os indicadores de eficiência do equipamento - EPM = 0,3, I = 0,3 e Área de Erro = 178,13 cm<sup>2</sup> - apontam que o equipamento não apresenta uma boa precisão de separação. Por exemplo, valores de EPM de 0,3 são típicos para hidrociclones autógenos, um equipamento de precisão muito baixa (Derbrouck e Palowitch, 1963). Rubio (1988), por exemplo, comenta que para que se tenha separações com maior precisão, os valores da área de erro devem situar-se próximos a 10, enquanto que para valores superiores a 100 são resultados de separações imprecisas. Dados

reportados por Sampaio e Tavares (1990) em espirais concentradoras brasileiras indicaram valores de  $EPM = 0,195$ ,  $I = 0,247$  e de Área de Erro =  $141 \text{ cm}^2$ . Os indicadores de desempenho obtidos neste trabalho igualam ou são piores aos obtidos por estes autores.

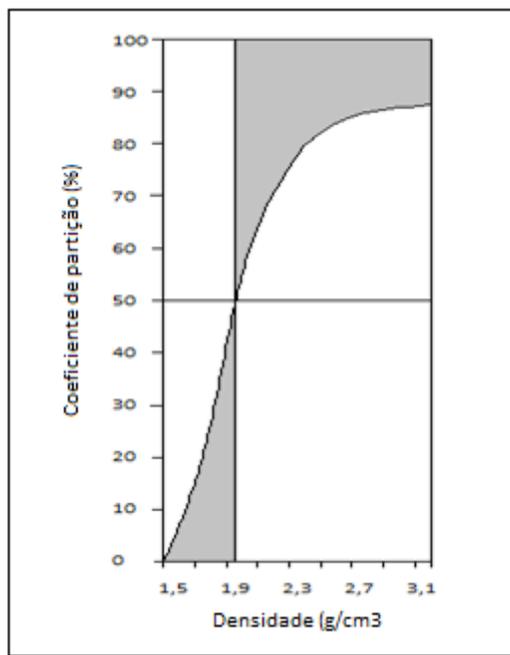


Figura18: Área de erro da espiral estudada.

#### 6.4 AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A Tabela 11 mostra o balanço de massa, o teor de cinzas e enxofre bem como o potencial de geração acidez (AP), potencial de neutralização (NP) e o potencial de geração de acidez líquido (NNP) da alimentação e dos produtos da espiral da amostra do 01/04/2014. Pode-se observar que todos os materiais são geradores de acidez:  $NNP < -20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$ . O rejeito, material descartado, apresenta um NNP de  $-209,4 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$ .

Tabela 11: Balanço de massa e análises imediata do material de alimentação e saídas na operação da espiral (concentrado e rejeito). Fonte: autor

Parâmetros	Alimentação	Concentrado Carvão	Rejeito
Massa (%)	100	35,0	64,9
Cinzas (%)	69,5	50,3	79,9
S total (%)	4,8	1,4	6,6
AP (kg CaCO <sub>3</sub> /t)	151,6	45,9	209,4
NP (kg CaCO <sub>3</sub> /t)	0	0	0
NNP (kg CaCO <sub>3</sub> /t)	- 151,6	- 45,9	- 209,4

A Tabela 12 mostra de forma comparativa, alguns dados referentes aos rejeitos grossos gerados no processo de jigagem (dados de Amaral Filho, 2014) e os rejeitos finos gerados nas espirais neste trabalho. Considerou-se nesta simulação uma produção de 100.000 t/mês de carvão ROM e a seguinte distribuição de massa: 30.000 t/mês de concentrado de carvão grosso (30%), 49.000 t/mês de rejeito grosso (49%), 6.200 t/mês de concentrado de carvão fino das espirais (6,2 %) e 11.600 t/mês rejeito das espirais (11,6%). A diferença restante, de 3.200 t/mês, seria destinada ao circuito de flotação.

Tabela 12: Comparativo entre a geração de rejeitos finos do circuito de espirais e os rejeitos grossos gerados na operação de jigagem. Fonte: autor

	Rejeito fino (este trabalho)	Rejeito grosso (Amaral Filho, 2014)
Teor de S (%)	6,6	7,0
NNP (kg CaCO <sub>3</sub> /t)	- 209,4	- 217,3
Granulometria (mm)	entre 0,1 e 2,0	entre 2 e 50,0
Área superficial (m <sup>2</sup> /g)	40,9	-
Massa de material gerada (t/mês)	11.600,00	30.000,00
Massa de S descartada (t/mês)	773,72	2.100,00
Massa de pirita descartada (t/mês)	1459,8	3962,3

Pode-se verificar que o teor de enxofre do rejeito grosso (gerado no processo jigagem) e do rejeito fino (gerado nas espirais) são semelhantes, da ordem de 6 a 7%

de enxofre. Assim, o potencial de geração de acidez líquido (NNP) também fica semelhante, um pouco acima de 200 kg  $\text{CaCO}_3/\text{t}$  (em valores negativos).

Deve-se ressaltar, contudo, que a reatividade do material fino para a oxidação na presença de oxigênio e água é maior do que a dos grossos, em função de menor granulometria e maior área superficial.

## 7. CONCLUSÕES

Em valores médios, a alimentação das espirais apresenta um teor de cinzas de 67,5%, um teor de enxofre de 5,2% e um poder calorífico superior de 2377,0 cal/g. O concentrado apresentou um teor de cinzas de 50,5%, um teor de enxofre de 1,7% e um poder calorífico superior de 3978,0 cal/g; enquanto que o rejeito um teor de cinzas 78,2%, um teor de enxofre de 7,5% e um poder calorífico superior de 1364,0 cal/g. A recuperação mássica de concentrado é de aproximadamente 40%. Assim, o concentrado atende as especificações da termoelétrica em relação ao teor de enxofre e matéria volátil e não atende as especificações de cinzas e poder calorífico. O concentrado das espirais consegue destinação somente se misturado a carvões de melhor qualidade produzidos pela mesma ou outras mineradoras.

A granulometria do material de alimentação da espiral situa-se na faixa entre 0,1 e 2,0 mm, havendo acréscimo significativo no teor de cinzas e de enxofre para as partículas mais finas.

Quanto a lavabilidade, os valores de NGM do material de alimentação estão entre 10 e 20 % na faixa de densidade entre 1,5 a 2,1 e NGM entre 20 e 35% na faixa de densidade entre 2,1 e 2,8. Na densidade de corte, de 2,0, o valor do NGM foi de 15%, caracterizando o material como moderadamente difícil ou de difícil separação.

A eficiência do beneficiamento na espiral é baixa. O valor do Desvio Provável Médio (EPM), Imperfeição (I) e a Área de Erro foram, respectivamente, de 0,30, 0,30 e 178,13 cm<sup>2</sup>. Esses parâmetros apontam que o equipamento não apresenta uma boa precisão de separação.

O rejeito de carvão descartado na espiral apresenta um NNP de – 209,44 kg CaCO<sub>3</sub>/t, indicando um alto potencial de geração de drenagem ácida. Deve-se somar a isso a baixa granulometria (entre 0,1 e 2,0 mm) e a alta área superficial (41 m<sup>2</sup>/ g) do material, que certamente propiciará taxas mais altas de geração de acidez que o rejeito grosso.

As características do rejeito de carvão, com teor de cinzas de 78 a 80%, S de 6 a 7 % (11 a 13% FeS<sub>2</sub>) e poder calorífico 1200 a 1500 cal/g impossibilitam a comercialização do material sem operações adicionais. Contudo, o material apresenta potencial para ser processado em métodos hidrometalúrgicos para o aproveitamento do S e Fe presente na pirita.

Analisando os dados de uma forma geral, as espirais, mesmo com a baixa

precisão, estão exercendo sua função de forma satisfatória para a empresa no sentido de produção de um carvão energético com teor de S aceitável, não deixando dúvida sobre sua aplicabilidade. Ressalta-se, porém, que estes resultados poderiam ser melhorados quando se trabalha com equipamentos mais precisos.

## 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Estudar técnicas para a concentração da pirita descartada nos rejeitos das espirais. Ênfase para processos físico-químicos, como a flotação.
- ✓ Desenvolver reatores para o processamento bio/hidrometalúrgico do rejeito das espirais com o objetivo de recuperação do Fe e do S contido na pirita.
- ✓ Estudar técnicas alternativas para o beneficiamento de finos de carvão.
- ✓ Realizar estudos com carvões de outras empresas e de outras camadas.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, J.R. **Avaliação Ambiental e do Potencial de Aproveitamento de Um Modulo de Rejeitos de Carvão na Região Carbonífera de Santa Catarina.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 79p. 2009.

AMARAL, J.R. **Avaliação Ambiental e do Potencial de Aproveitamento de Um Modulo de Rejeitos de Carvão na Região Carbonífera de Santa Catarina.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 79p. 2009.

AMARAL, J.R. **Aproveitamento de Rejeitos de Carvão em Santa Catarina, Brasil.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 161p. 2014.

ARENARE, D. S. et al. Espirais Concentradoras no Tratamento de Minérios de Ferro: Uma Breve Revisão. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IRON ORE, 2008, São Luís, MA. São Paulo: ABM, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8289:** Carvão Mineral: Determinação do Teor de Cinzas. Rio de Janeiro 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8290:** Carvão Mineral: Determinação do Teor de Matérias Voláteis. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8293:** Carvão Mineral: Determinação da Umidade Higroscopia. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8299:** Carvão Mineral: Determinação de Carbono Fixo. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8629:** Carvão Mineral: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8738:** Carvão Mineral: Ensaio Densimétrico. Rio de Janeiro, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

BORMA, L.S.; SOARES, P.F.M. **Drenagem Ácida e Gestão de Resíduos Sólidos de Mineração. Em: Extração de Ouro. – Princípios, tecnologia e ambiente.** Trindade, B.E., Barbosa Filho, O. (EDS), CETEM, p 243 – 266, 2002.

Carbonífera Criciúma S.A.. **Carbonífera Criciúma S/A.** Disponível em: <<http://www.carbocri.com.br/site/empresa/historico/>>. Acesso em: 08 de dezembro

2014.

CAVALCANTE, G. F. ; KLUJSZO, L. A. C. ; SAMPAIO, C. H. . **Princípios da Espiral Concentradora**. Egatea. Revista da Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre, v. 20, n.1, p. 55-64, 1992.

EPA–United States Environmental Protection Agency. **Acid mine drainage prediction**. Washington DC, 1994. Disponível em: <<http://water.epa.gov>>. Acesso em: julhode2015.

HEILMAN, M. D.; CARTER, D. L.; GONZALEZ, C. L. The ethylene glycol monoethyl ether technique for determining soil surface área. **Soil Science**.v.100, p.409-413, 1965.

HOLLAND-BATT, A.B. **Some design considerations for spiral separators**. Minerals Engineering, v. 8, n. 11, p. 1381-1395, Nov. 1995.

KONTOPOULOS, A. Acid mine drainage control. In: CASTRO, S.H.; VERGARA, F.; SÁNCHEZ,M.A. (Eds) **Effluent treatment in the mining industry**. University of Concepción, p.57- 118, 1998.

HORSFALL, D.W. **Coal preparation for plant operators**. Cape and Transvaal Printers Ltd, Cape Town, 1980.

LAPAKKO, K. Evaluation of Tests for Predicting Mine Waste Drainage pH. Draft report to the Western Governors' Association, 1992.

LAWRENCE,R.W.;SCHESKE,M.Amethodto calculatetheneutralizationpotentialfor miningwastes.**EnvironmentalGeology**,v.32,n.2,p.100-106,1997.

LECO. Manual do Equipamento LECO AC 500. Criciúma, 2014.

LECO. Manual do Equipamento LECO CHN 628 Séries S, “Sulfur”. Criciúma, 2014.

LECO. Manual do Equipamento LECO CHN 628 Séries. Criciúma, 2014.

LEONARD, J.W. et al. **Coal Preparation**. The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., Nova York, EUA, 1979.

MAIA, A.D.; Avaliação da geração de drenagem ácida em um solo fabricado em laboratório contendo sulfeto de ferro e matéria. p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro -UFRJ, 2004.

MAJUMDER, A.K.; BARNWALL, J.P. Development of a new coal washability index. **Minerals Engineering**, v. 17, p. 96-96, 2004.

MARCELO, R. R. **Caracterização e Beneficiamento das Cinzas de Incineração de Aparas de Couro para Uso como Pigmento Cerâmico a Base de Óxido de Cromo**.

Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 80p. 2013.

MONTEIRO, K.V. **Carvão: O Combustível de Ontem**. Núcleo Amigos da Terra, Porto Alegre, 2004.

NASCIMENTO, F.M.F. et al. **Impactos ambientais nos recursos hídricos da exploração de carvão em Santa Catarina**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO, 1.; CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA, 2., Belo Horizonte, 2002. Resumos. Belo Horizonte, 2002.

PETERSON, MICHAEL; **Produção de sulfato ferroso a partir da pirita: desenvolvimento sustentável**, (Tese de doutorado). Florianópolis, 2008. Disponível em: <<http://www2.eng.ufsc.br/teses/d059.pdf>> Acesso em: 2. dez. 2011.

PRICE, W.A. et al. Guidelines for the prediction of acid rock drainage and metal leaching for mines in British Columbia: Part II Recommended procedures for static and kinetic testing. 4<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE, Vancouver, British Columbia, 1997, p.15-30.

RUBIO, J. **Carvão Mineral: Caracterização e Beneficiamento**. Vol. 1. Porto Alegre: Nova Linha Artes Gráficas, 240 p., 1988.

SCHNEIDER, C. H. Caracterização da Pirita - Carbonífera Criciúma SA, 4p., 2013.

SCHNEIDER, C.L; NORBERT, L.S. Caracterização dos rejeitos de jigagem da camada Barro Branco da CCSA. III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. Gramado, 2011.

SKOUSEN, J.G. **Acid Mine Drainage Treatment**, Division of Plant and Soil Science, College of Agriculture and Forestry, WVU Extension Principal Chemist, Morgantown, WV. Web Posted October 7, 1998

SOBEK, A.A. et al. **Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Minessoils**. US EPA, 1978.

STUMM, W. e MORGAN, J.J., "Aquatic Chemistry", 2<sup>a</sup> ed., Wiley – In: Interscience, Nova York (EUA.), 1981.

TAVARES, L.M.M. e SAMPAIO, C.H. **Beneficiamento Gravimétrico**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 601p., 2005.

World Coal Institute – WCI. **The Coal Resource, A comprehensive overview of coal**. World Coal Institute. Londres, Inglaterra, 44p., 2005.

WEILER, J.. **Tecnologias Mais Limpas na Mineração de Carvão: Minimização da Geração de Drenagem Ácida de Minas pelo Método de Isolamento de Sulfetos**. (Trabalho de Conclusão de Curso), Graduação em Engenharia Ambiental - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

## ANEXO

Teores de enxofre no material afundado e flutuado nas frações densimétricas; e valores de NGM das frações.

Frações				Flutuado		Afundado		NGM
Faixa densimétrica	Densidade	Massa (%)	Teor de enxofre (%)	Somatório de Massa (M1) (%)	Teor de S Massa acumulada	Somatório de Massa (M2) (%)	Teor de S Massa acumulada	
<1,4	1,3	10,8	1,1	10,8	1,1	100,0	3,4	-
1,4-1,6	1,5	12,7	1,2	23,6	1,1	89,2	3,6	22,0
1,6-1,8	1,7	9,3	1,4	32,9	1,2	76,4	4,0	15,8
1,8-2,0	1,9	6,5	1,7	39,4	1,3	67,1	4,4	13,9
2,0-2,2	2,1	7,4	1,7	46,8	1,3	60,6	4,7	16,4
2,2-2,4	2,3	9,0	1,3	55,8	1,3	53,2	5,1	31,7
2,4-2,6	2,5	22,7	0,9	78,5	1,2	44,2	5,9	37,4
2,6-2,8	2,7	14,6	1,1	93,1	1,2	21,5	11,2	21,5
>2,8	3,5	6,9	32,8	100,0	3,4	6,9	32,8	

Teores de cinzas no material afundado e flutuado nas frações densimétricas; e valores de NGM das frações.

Frações				Flutuado		Afundado		NGM
Faixa densimétrica	Densidade	Massa (%)	Teor de Cinzas (%)	Somatório de Massa (M1) (%)	Teor de cinzas Massa acumulada	Somatório de Massa (M2) (%)	Teor de cinzas Massa acumulada	
<1,4	1,3	10,8	14,1	10,8	14,1	100,0	64,5	-
1,4-1,6	1,5	12,7	30,6	23,6	23,0	89,2	70,7	22,0
1,6-1,8	1,7	9,3	39,9	32,9	27,8	76,4	77,3	15,8
1,8-2,0	1,9	6,5	57,1	39,4	32,6	67,1	82,5	13,9
2,0-2,2	2,1	7,4	70,7	46,8	38,6	60,6	85,3	16,4
2,2-2,4	2,3	9,0	80,6	55,8	45,4	53,2	87,3	23,6
2,4-2,6	2,5	22,7	90,6	78,5	58,5	44,2	88,7	
2,6-2,8	2,7	14,6	94,2	93,1	64,1	21,5	86,6	-
>2,8	3,5	6,9	70,6	100,0	64,5	6,9	70,6	